ISARA-LYON
31, place Bellecour
69288 LYON cedex 02

CHAMBRE D'AGRICULTURE DE LA DRÔME
95, avenue Georges Brassens
26500 BOURG-LÈS-VALENCE

RHÔNALPÉNERGIE-ENVIRONNEMENT
10, rue des Archers
69002 LYON

LES BIOCARBURANTS EN RHÔNE-ALPES :

POTENTIALITÉS DES OLÉAGINEUX ET OPPORTUNITÉS DE L'HUILE VÉGÉTALE PURE

Mémoire de Fin d'Étude

33ème promotion (2000-2005)

GUIRAL EMMANUEL
SAINT CYR CHRISTOPHE
Élèves-Ingénieurs ISARA-Lyon

Date : 8 septembre 2005

Enseignant responsable : Yvan GAUTRONNEAU

Directeurs de Mémoire : Sarah FRANCO
Marc DELORME

Ce document ayant été réalisé par des Élèves-Ingénieurs de l'ISARA-Lyon dans le cadre d'une convention avec la Chambre d'agriculture de la Drôme et Rhônalpénergie-Environnement, toute mention, communication ou diffusion devra faire état de l'origine ISARA-Lyon.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier tout particulièrement M^elle^ Sarah FRANCO et M. Marc DELORME, nos directeurs de mémoire de la Chambre d'agriculture de la Drôme et de Rhônalpénergie-Environnement, pour le suivi de notre travail tout au long du stage.

Nous remercions également M. Cédric CHARRIER, animateur de la FDCUMA de la Drôme, pour l'intérêt qu'il a toujours manifesté pour ce sujet.

Nous remercions vivement M. Didier CHOLLET, Ingénieur régional Sud-Est au CETIOM, M. Gilles VAITILINGOM, chercheur au CIRAD de Montpellier, et M. Etienne POITRAT, responsable du thème biocarburants à l'ADEME, pour les précieux renseignements qu'ils ont pu nous apporter.

Un grand merci à M. Yvan GAUTRONNEAU, professeur d'agronomie à l'ISARA-Lyon, ainsi qu'à M. Patrick MUNDLER, professeur d'économie à l'ISARA-Lyon, pour leur aide précieuse dans la réalisation de notre mémoire.

Merci également à tous ceux qui, à leur façon, à un moment donné, nous ont apporté leur aide.

Nous remercions enfin tout le personnel de la Chambre d'agriculture de la Drôme et de Rhônalpénergie-Environnement, et tout particulièrement Mme Muriel COLIN, documentaliste à la Chambre d'agriculture de la Drôme, qui ont largement facilité la réalisation de ce stage.

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS 3

SOMMAIRE 4

INTRODUCTION 10

1 LA PRODUCTION D'OLÉAGINEUX 12

1.1 Aspects agronomiques 12

1.1.1 Le colza 12

1.1.2 Le tournesol 13

1.2 Aspects environnementaux 14

1.2.1 Le colza 14

1.2.2 Le tournesol 14

1.3 Les cultures associées 15

1.4 La Politique Agricole Commune 16

1.4.1 Comment utiliser la jachère pour la production de biocarburants sur l'exploitation ? 17

1.4.2 Comment bénéficier de l'aide aux cultures énergétiques ? 19

1.5 Surfaces et volumes actuels des grandes cultures en Rhône-Alpes 20

1.5.1 Le colza 20

1.5.2 Le tournesol 21

1.5.3 Production, utilisation, importation et exportation d'oléagineux en France 21

1.6 Surfaces et volumes potentiels pour l'HVP en Rhône-Alpes 22

1.6.1 Consommation actuelle de fioul dans l'agriculture en Rhône-Alpes 22

1.6.2 Transfert de surfaces à destination de l'HVP 22

2 LA TRANSFORMATION DES OLÉAGINEUX 25

2.1 Propriétés physiques, chimiques et biologiques des graines 25

2.1.1 Caractéristiques physiques 25

2.1.1.1 Humidité 25

2.1.1.2 Teneur en impuretés 26

2.1.1.3 Température et poids spécifique 26

2.1.2 Caractéristiques chimiques 26

2.1.2.1 Teneur en matières grasses 26

2.1.2.2 Profil en acides gras 27

2.1.2.3 Teneur et profil en glucosinolates 27

2.1.2.4 Teneur en protéines et profil en acides aminés 28

2.1.3 Caractéristiques biologiques 28

2.2 L'Huile Végétale Pure 29

2.2.1 Propriétés physiques et chimiques de l'huile 29

2.2.1.1 Caractéristiques chimiques 29

2.2.1.2 Caractéristiques physiques 33

2.2.2 Normalisation de l'huile 36

2.2.3 Trituration et traitements de l'huile 37

2.2.3.1 Pressage 37

2.2.3.2 Purification de l'huile brute 42

2.2.3.3 Stockage de l'Huile Végétale Pure 49

2.3 L'Ester Méthylique d'Huile Végétale 51

2.3.1 Présentation de la filière Diester® 51

2.3.2 Procédé de fabrication du Diester® 52

2.3.2.1 Trituration des oléagineux 52

2.3.2.2 Semi-raffinage 52

2.3.2.3 Estérification 52

2.4 Aspects énergétiques des biocarburants 53

2.4.1 Consommations énergétiques des cultures 53

2.4.1.1 Le colza 53

2.4.1.2 Le tournesol 55

2.4.2 Bilans énergétiques des biocarburants 56

2.4.2.1 Bilan énergétique de l'EMHV 56

2.4.2.2 Bilan énergétique de l'HVP 58

3 L'UTILISATIONS DES PRODUITS 60

3.1 L'Huile Végétale Pure 60

3.1.1 Les modifications des moteurs 60

3.1.1.1 Les moteurs à injection indirecte 60

3.1.1.2 Les moteurs à injection directe 61

3.1.1.3 Les moteurs à injection directe haute pression 62

3.1.2 Performances globales comparées des moteurs carburant à l'Huile Végétale Pure et au fioul 64

3.1.2.1 Les véhicules légers 64

3.1.2.2 Les tracteurs 68

3.1.3 Les émissions de polluants 68

3.1.3.1 Les normes européennes d'émission de polluants 68

3.1.3.2 Retours d'expériences de mesures d'émission de polluants 69

3.1.4 L'huile combustible 71

3.1.5 Autoconsommation d'Huile Végétale Pure 71

3.1.5.1 Besoins matériels 71

3.1.5.2 Chaînes logistiques 72

3.1.6 Consommation d'Huile Végétale Pure hors secteur agricole 72

3.1.6.1 Production 72

3.1.6.2 Chaîne logistique 72

3.2 L'Ester Méthylique d'Huile Végétale 73

3.3 Tourteaux gras 74

3.3.1 Le tourteau de colza et de tournesol en France 74

3.3.2 Distinction entre tourteau industriel et tourteau gras 75

3.3.3 Facteurs de variations du taux de matières grasses dans le tourteau 76

3.3.4 Stockage du tourteau gras 76

3.3.5 Valeurs nutritionnelles 76

3.3.6 Incorporation dans l'alimentation animale 78

3.3.6.1 Cas des porcs 78

3.3.6.2 Cas des volailles 79

3.3.6.3 Cas des ruminants 79

3.3.7 Possibilités d'utilisation par les fabricants d'aliments du bétail 80

4 APPROCHE ÉCONOMIQUE 82

4.1 Législation et fiscalité 82

4.2 Simulations économiques 84

4.2.1 Ferme céréalière en plaine de Valence 85

4.2.1.1 1er cas : l'agriculteur investit seul 85

4.2.1.2 2ème cas : l'agriculteur adhère à une CUMA 86

4.2.1.3 3ème cas : l'agriculteur adhère à une CUMA qui est subventionnée pour l'achat de sa presse 86

4.2.2 Ferme de polyculture-élevage en plaine de l'Ain 87

4.2.2.1 1er cas : l'agriculteur achète les graines nécessaires sans modifier son assolement 87

4.2.2.2 2ème cas : l'agriculteur augmente la part d'oléagineux dans sa rotation 88

5 LES ACTEURS EN RHÔNE-ALPES 90

5.1 Descriptif des pionniers de l'HVP en Rhône-Alpes 90

5.2 Quelles perspectives pour l'HVP en Rhône-Alpes ? 91

5.3 Atouts et contraintes des filières EMHV et HVP en Rhône-Alpes .. 95

5.3.1 L'Ester Méthylique d'Huile Végétale 95

5.3.2 L'Huile Végétale Pure 96

CONCLUSION 97

ANNEXES 99

1 MÉTHODOLOGIE 100

1.1 Le contexte 100

1.1.1 Les origines de la demande 100

1.1.2 Intérêt de la démarche 101

1.2 Objectifs et enjeux 102

1.2.1 Objectifs de l'étude 102

1.2.1.1 Synthèse des paramètres techniques, environnementaux et économiques des filières 103

1.2.1.2 Évaluation de l'impact de la réalisation de projet HVP sur le revenu agricole 103

1.2.2 Intérêts et limites de la méthode 104

1.2.2.1 Intérêts de la méthode 104

1.2.2.2 Limites de la méthode 104

2 LES NORMES DU GAZOLE ET DU FIOUL 105

2.1 Norme de production du gazole 105

2.2 Norme de production du fioul 106

3 LES NORMES EUROPÉENNES D'ÉMISSION DE POLLUANTS 107

3.1 Les catégories de véhicules 107

3.2 Calcul des émissions polluantes 111

4 LE MATÉRIEL DE PRODUCTION 113

4.1 Les presses 113

4.1.1 Les différents modèles 113

4.1.2 Répertoire des fabricants de presses 115

4.2 Les filtres 116
4.2.1 Les différents modèles 116
4.2.2 Répertoire des fabricants de filtres 117

5 SIMULATIONS ÉCONOMIQUES 118

5.1 Législation et fiscalité 118

5.2 Mode d'emploi de la simulation 119

5.3 Les références utilisées 122

5.4 Les différents exemples en détail 125
5.4.1 Ferme céréalière de la plaine de Valence 125
5.4.1.1 1er cas : l'agriculteur investit seul 125
5.4.1.2 2ème cas : l'agriculteur adhère à une CUMA 130
5.4.1.3 3ème cas : l'agriculteur adhère à une CUMA qui est subventionnée pour l'achat de sa presse 135
5.4.2 Ferme de polyculture-élevage en plaine de l'Ain 140
5.4.2.1 1er cas : l'agriculteur achète les graines nécessaires sans modifier son assolement 140
5.4.2.2 2ème cas : l'agriculteur augmente la part d'oléagineux dans sa rotation 145

6 BIBLIOGRAPHIE 150

7 LISTE DES FIGURES 156

8 LISTE DES GRAPHIQUES 157

9 LISTE DES TABLEAUX 158

10 TABLE DES ABRÉVIATIONS 160

11 CONTACTS 161

INTRODUCTION

Dans un contexte où l'énergie est devenue indispensable au fonctionnement de l'économie et devant la déplétion des énergies fossiles, la recherche d'alternatives énergétiques devient une préoccupation majeure à l'échelle planétaire. Les accords de Kyoto (1992) affichent clairement cette volonté de changement, et plus récemment en Europe les directives Biocarburants (2003/30) imposent aux États-membres le développement de bioénergies dans les transports, avec l'introduction obligatoire de 2 % de biocarburants en 2005 pour arriver à 5,75 % en 2010.

Devant cette opportunité, la Chambre d'agriculture de la Drôme a ouvert une réflexion sur les biocarburants à la fin de l'année 2004. Pour le suivi du projet, un comité de pilotage a été mis en place en partenariat avec Rhônalpénergie-Environnement (69), le lycée du Valentin (26), la FDCUMA[1] de la Drôme, le Conseil Général de la Drôme, la Chambre de Commerce et d'Industrie de la Drôme, l'ADEME[2], le CETIOM[3] et la Fédération Française des Combustibles, Carburants et Chauffage (FF3C).

Cette étude tente de faire le point sur les différentes possibilités de production de biocarburants à partir d'oléagineux sur la région Rhône-Alpes. Une filière industrielle est déjà en place depuis 1992 pour la production d'ester méthylique d'huile végétale (EMHV). Parallèlement, depuis quelques années, se développent de manière informelle la production et l'utilisation d'huile végétale pure carburant (HVP).

La Chambre d'agriculture de la Drôme souhaite développer de nouveaux débouchés pour l'agriculture, notamment non alimentaires. L'implantation d'une nouvelle unité d'estérification à Sète (34) va nécessiter une quantité importante d'oléagineux (du colza principalement), ce qui risque très certainement de modifier les pratiques agricoles rhônalpines.

Parallèlement, la production à la ferme d'HVP[4]-carburant et son autoconsommation sur l'exploitation présentent un regain d'intérêt depuis l'inflation du baril de pétrole. De plus, le tourteau fermier, coproduit de la trituration, intéresse de plus en plus d'éleveurs à la recherche de traçabilité. À l'heure actuelle, tant pour l'utilisation de l'huile végétale non estérifiée comme carburant que pour l'introduction de tourteaux fermiers gras en alimentation animale, très peu d'études scientifiques complètes ont été menées, la plupart des résultats sont encore et seulement des retours d'expériences d'agriculteurs.

Rhônalpénergie-Environnement a une vision plus large de l'utilisation de l'HVP comme carburant, avec le développement d'une production et d'une distribution à plus grande échelle à destination notamment des véhicules particuliers. Mais ce développement des biocarburants restera obligatoirement restreint par la production trop faible de graines d'oléagineux : il faudrait en effet cultiver toute la France en oléagineux pour répondre à sa consommation en gazole.

[1] FDCUMA : Fédération Départementale des Coopératives d'Utilisation de Matériel Agricole.
[2] ADEME : Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie.
[3] CETIOM : Centre Technique Interprofessionnel des Oléagineux Métropolitains.
[4] HVP : Huile Végétale Pure.

Ce mémoire est principalement réalisé d'après une recherche bibliographique, étoffée par des rencontres d'utilisateurs et d'experts. Les deux filières seront traitées en intégralité, de la production de la graine jusqu'à son utilisation finale dans les moteurs.

La première partie est consacrée à la production d'oléagineux, même si seuls le colza et le tournesol sont étudiés. Elles restent en effet les deux principales cultures oléagineuses adaptées aux conditions pédoclimatiques de Rhône-Alpes, avec les meilleurs rendements et une bonne qualité d'huile carburant. De plus, les surfaces actuelles d'oléagineux sont recensées dans le but d'estimer les productions possibles et potentielles de biocarburants dans la région.

Dans un deuxième temps, la transformation et la fabrication de ces deux biocarburants sont détaillées afin d'en expliciter leurs différences. Contrairement à la production d'EMHV[5] qui s'appuie sur un procédé défini et breveté par l'IFP[6], l'HVP reste pour l'instant un produit non normalisé même si des avancées sont réalisées dans d'autres pays européens. Le détail des caractéristiques physiques et chimiques des graines et des huiles va ensuite permettre de juger les variations de qualité d'HVP en fonction du matériel et du process utilisés. Un bilan énergétique de ces deux filières a aussi été calculé d'après les études de l'ADEME.

La troisième partie regroupe les différentes expériences d'utilisation de ces biocarburants dans les moteurs, dans un but de trouver à l'HVP des solutions techniques et économiques pour la carburation des moteurs Diesel. Le principal coproduit de ces transformations, le tourteau, est aussi abordé, sachant qu'il peut être valorisé en alimentation animale tout en permettant de diminuer la dépendance protéique de la France vis-à-vis du soja importé.

L'aspect économique est la quatrième partie de l'étude. Des simulations concernant l'HVP sont présentées avec divers scénarios, afin de juger de l'opportunité réelle d'un tel atelier sur l'exploitation. Les résultats sont parfois mitigés et ne sont pas toujours en adéquation avec l'espérance des agriculteurs malgré la hausse du carburant.

En cinquième et dernière partie, une ouverture sur l'avenir potentiel de ces biocarburants en région Rhône-Alpes est présentée en listant les principaux acteurs connus actuels et potentiels. Même si les deux filières étudiées ne sont pas opposables, une synthèse de leurs atouts et contraintes permet de laisser à chacun le choix de s'orienter dans la voie qu'il estime la plus intéressante.

Le comité de pilotage mis en place autour de cette réflexion souhaitait un document technique et opérationnel sur le sujet. Pour cette raison, les questions méthodologiques ont été reportées en *annexe 1. Méthodologie*.

[5] EMHV : Ester Méthylique d'Huile Végétale.
[6] IFP : Institut Français du Pétrole.

1 LA PRODUCTION D'OLÉAGINEUX

1.1 Aspects agronomiques

1.1.1 Le colza

(CETIOM, 2001 et 2004)

La culture de colza est largement reconnue pour ses avantages au niveau de la structure des sols au travers de deux observations.

Les liens génétiques du colza avec la navette lui ont transmis un **pouvoir d'enracinement profond** avec une racine pivotante capable de descendre jusqu'à une profondeur de plus d'un mètre en dessous de la surface du sol. Cette caractéristique lui permet de remonter vers la surface des éléments minéraux tels que les nitrates. De plus, même par un climat sec le colza est capable de s'alimenter en eau en profondeur ; et même si les conditions optimales ne sont pas réunies lors de certaines périodes d'élaboration des composantes de rendements (à la floraison par exemple), le colza est capable de compenser partiellement en fin de cycle en multipliant le nombre de ramifications ou en augmentant le poids de ses grains. Toutefois, l'expression de ces avantages nécessite quelques précautions de conduite importantes à rappeler dans le contexte rhônalpin, où des périodes de stress sont régulièrement observées.

Semé fin août début septembre et récolté fin juin début juillet, le colza possède un **cycle de végétation extrêmement long** : de 10 à 11 mois. Cette culture permet ainsi, presque toute l'année, une bonne couverture du sol et le protège de l'érosion. Une forte croissance dès le semis lui permet de valoriser les éléments minéraux et avec une récolte au début de l'été le colza n'a pas besoin d'eau durant la période estivale. De même, la récolte s'effectuant sur un sol sec, il est moins susceptible d'être tassé.

Outre ses avantages agronomiques, cette culture est aussi considérée comme une « culture d'équilibre ». D'un point de vue organisation du travail, production et collecte, le colza optimise la répartition du temps de travail et limite les risques ; en effet la fertilisation, les traitements et la récolte s'intercalent entre les interventions réalisées sur les céréales.

Économiquement, le colza est devenu incontournable dans certaines régions. Il est vrai que le rendement n'est pas trop affecté dans le cas de la production de « maïs sur maïs » (même si aujourd'hui des questions parasitaires commencent à se poser), mais il n'en est pas de même pour les céréales à paille. Les atouts agronomiques du colza se traduisent par un effet précédent très net sur le blé qui suit. En moyenne, les études menées par le CETIOM montrent que les rendements d'un blé de colza sont 10 % supérieurs à ceux d'un blé de blé ou d'une monoculture de blé *(CETIOM, 12/2004)*. Ce gain de rendement provient du bon état structural du sol après un colza et aussi d'un meilleur état sanitaire des blés car le colza permet de « casser » le cycle de certaines maladies spécifiques des céréales (fusariose, piétin échaudage, piétin verse…). Cette succession permet en outre de réduire le coût des intrants liés à la maîtrise de ces attaques parasitaires. Il est cependant conseillé de ne faire revenir le colza sur une même parcelle moins que tous les 3-4 ans, afin de réduire les risques de maladies et de flores liées au colza.

1.1.2 Le tournesol

(CETIOM, 2005)

Le tournesol est connu pour sa rusticité et sa faible demande en intrants comme en eau. Doté d'une longue racine pivotante capable de puiser l'eau et les éléments nutritifs situés à deux mètres de profondeur, le tournesol s'adapte assez bien à la sécheresse, mais tout stress hydrique marqué au stade de la floraison demeure préjudiciable. Le potentiel de la culture et la capacité de la plante à résister au stress hydrique sont intimement liés à sa dynamique de croissance. Si un manque d'eau apparaît au début du développement de la plante, le nombre et la croissance des feuilles seront modérés. Il s'en suivra une évapotranspiration estivale minimisée et une bonne capacité de résistance à un éventuel stress hydrique durant les phases floraison/réalisation du nombre de graines et remplissage. En cas de retour des pluies estivales, ou en présence de quelques apports d'eau durant ces phases, le potentiel de la plante pourra même s'exprimer pleinement.

À l'opposé, si ce manque d'eau n'est que « tardif », faisant suite à une phase de croissance importante, la résistance au stress hydrique sera faible et le rendement très réduit. La plante ne pourra pas assurer la forte évapotranspiration engendrée par la surface foliaire importante mise en place, les feuilles faneront plus rapidement, avec comme conséquence un effondrement très rapide de la surface foliaire active en pleine phase de concrétisation du nombre de graines, réduisant le potentiel.

De même que le colza, le tournesol s'avère être une bonne tête d'assolement pour les céréales comme le montrent les études du CETIOM. En libérant tôt le sol, le tournesol offre des conditions optimales d'implantation pour le blé, voire pour l'interculture dans l'attente d'un semis de printemps. Cet oléagineux permet la lutte contre certaines graminées dans la rotation et surtout, assure une rupture du cycle des maladies des céréales (fusariose, piétins…). L'effet bénéfique, mesuré, d'un précédent tournesol se traduit par une hausse moyenne de rendement de 5 % du blé qui suit, pouvant aller jusqu'à 10 à 20 % par rapport à un blé de blé, avec une réduction du coût de protection visant les maladies dans le blé qui suit. *(CETIOM, 2001)*

Le tournesol permet aussi une meilleure répartition des travaux agricoles, avec une date de semis souple avant les autres cultures de printemps (maïs, soja par exemple), mais surtout un itinéraire technique limité (seulement 7 à 8 passages entre la préparation du sol et la récolte) et complémentaire de celui des céréales d'hiver. *(CETIOM, 2005)*

1.2 Aspects environnementaux

1.2.1 Le colza

D'un point de vue environnemental, le colza s'inscrit comme une culture du développement durable. De par ses caractéristiques, il est un véritable piège à nitrates à l'automne ; même en cas de surfertilisation du précédent le colza absorbe l'azote et limite les pertes par lessivage en hiver. L'apport d'azote sur colza à l'automne n'est donc pas nécessaire *(CETIOM, 2001)*.

Plante à gros volume de végétation, le colza atteint un mètre vingt à un mètre cinquante de hauteur et les pailles sont laissées sur place (ce qui n'est pas toujours le cas des céréales), ce qui permet après récolte de restituer à la terre entre 8 et 10 tonnes de matière sèche par hectare permettant au passage une amélioration du bilan humique des sols (environ 1 600 à 1 800 kg d'humus/ha). Assolé avec des céréales, le colza peut donc permettre d'améliorer le taux de matière organique du sol et par conséquent de stocker du carbone dans les sols agricoles ; c'est un point positif pour réduire l'effet de serre dû à la concentration en CO_2 de l'atmosphère.

Le désherbage étant surtout réalisé au moment du semis (présemis à prélevée), c'est-à-dire à la fin de l'été, les matières actives ont la plupart du temps la possibilité d'être dégradées, laissant un sol libre de résidus importants de produits herbicides. De plus, en introduisant le colza dans la rotation, l'agriculteur peut gérer au mieux la flore adventice et l'utilisation de familles chimiques différentes limite les phénomènes de résistances, notamment pour la lutte contre les graminées qui reste délicate sur céréales.

Enfin, avant le semis de la céréale suivante, le maintien des repousses de colza sur la parcelle en été permet de maintenir une couverture du sol capable d'absorber 40 à 60 unités d'azote et de réduire fortement le risque de lessivage hivernal sous la céréale qui suit.

Dans les années 90, au démarrage de la filière Diester®, le CETIOM a mis au point un itinéraire technique raisonné de production de colza industriel sur jachère, dans une logique cohérente de production de « carburant vert ».

1.2.2 Le tournesol

(CETIOM, 2005)

Le tournesol possède généralement une image extrêmement positive dans l'opinion publique, sa fleur est symbolique à de nombreux titres, avec toutefois un bémol dans la région en raison de l'association à l'ambroisie, adventice qui demande un effort technique important tant dans les cultures de printemps que dans les intercultures pour une bonne maîtrise en tournesol. Ses besoins azotés totaux sont faibles, de l'ordre de 150 kg/ha. Son enracinement profond lui permet de satisfaire au moins 50 % de ses besoins.

De plus, la fertilisation azotée du tournesol a été optimisée par le CETIOM grâce à un outil de diagnostic, Héliotest, qui permet d'apporter en végétation l'azote réellement nécessaire à la culture tout en évitant les impasses et les apports systématiques. Ceci contribue à concilier revenu, qualité de la production et respect de l'environnement.

Les progrès génétiques aidant, les applications phytosanitaires pour une conduite correcte du tournesol restent modérées avec un ou deux passages pour le désherbage, seules interventions la plupart du temps en production pour consommation, auxquelles peuvent s'ajouter éventuellement un insecticide et un fongicide en production de semences dans la région.

Enfin, les dernières années (2003 et 2004) ont prouvé que le tournesol est capable de s'adapter aux conditions sèches persistantes. Peu consommateur d'eau, seulement 420 mm sur l'ensemble de son cycle (pluies et réserves du sol) couvrent ses besoins. Son système racinaire permet également de bien exploiter les ressources des différents horizons.

Le tournesol contribue de par tous ses avantages à l'équilibre des rotations, il reste une pièce maîtresse de l'agriculture raisonnée, alliant performance et respect de l'environnement.

1.3 Les cultures associées

(GUIRAL E., SAINT-CYR C., 2005)

Les cultures associées sont des cultures qui coexistent pendant tout ou partie du cycle végétatif sur une même parcelle au cours d'une campagne agricole. Pour être considérées comme cultures associées, les produits de récolte doivent être ramassés en même temps.

D'ailleurs, les aides PAC[7] prévoient, dans le cas de cultures associées annuelles, que la superficie de la parcelle soit répartie proportionnellement à la surface occupée par chaque culture. Dans le cas d'association entre une culture permanente et une culture annuelle, la totalité de la superficie de la parcelle est affectée à la culture permanente. Et dans le cas d'association de plusieurs cultures permanentes, la superficie est répartie proportionnellement à la surface de chacune.

La culture associée est une redécouverte de méthodes agricoles qui consistent donc à cultiver deux ou plusieurs espèces de plantes qui ont des périodes de croissance proches. Ceci permet l'utilisation simultanée des terres agricoles pour des cultures alimentaires et non alimentaires. Cette technique de culture tend à reproduire le système des forêts mixtes qui obtiennent de très bons rendements, c'est-à-dire que chaque culture occupe une strate différente dans l'espace.

De plus, ce système de cultures associées ne nécessite pas forcément d'investissement supplémentaire (le même matériel peut être utilisé), mais du matériel spécifique est tout de même conseillé pour arriver à des niveaux de rendements élevés. Ainsi, sur une exploitation visitée en Allemagne lors d'un voyage d'étude, le semis était réalisé auparavant en une seule fois, mais il est quand même préférable de séparer les deux espèces. Actuellement, le pois est semé d'une manière traditionnelle à une profondeur de 4-5 cm, puis la cameline est semée à la volée par dessus. Un roulage ou un passage de herse permet ensuite une bonne levée (notamment en cas d'absence de pluie).

[7] PAC : Politique Agricole Commune.

	1998/1999		1999/2000		2000/2001	
pois	31,37	29,5	24,92	32,45	0	49,73
cameline		5,1		8,14		1,98

Tableau 1 : Rendements de pois et de cameline.

Généralement, ce sont une ou plusieurs céréales ou légumineuses qui sont associées avec une espèce oléagineuse (cameline, tournesol, colza, moutarde…).

Lors de ce voyage en Allemagne, nous avons rencontré un agriculteur pratiquant la culture associée. Selon lui, les possibilités d'association de cultures sont nombreuses. On peut citer comme exemple : pois + cameline, pois + avoine, pois + avoine + cameline, pois + avoine + cameline + trèfle. Dans ce dernier exemple, le trèfle est semé 5 jours après les autres espèces, lors d'un passage de herse étrille, et il sera ensilé à l'automne. La séparation des graines récoltées est indispensable pour permettre une bonne valorisation de chacune des espèces implantées. L'agriculteur allemand s'est donc équipé de séparateurs et de silos de stockage.

Les deux principales cultures associées rencontrées sur cette exploitation allemande sont le pois et la cameline. La cameline (*Camelina sativa*, plante oléagineuse) germe tôt et développe rapidement de larges feuilles qui permettent de bien couvrir le sol et ainsi de limiter la pression d'adventices. Cela permet de réduire voire, comme le fait l'agriculteur allemand, d'éviter tout emploi d'herbicide (même en agriculture conventionnelle). La cameline joue aussi un rôle de soutien des plantes de pois, souvent soumis à des problèmes de verse à la maturité des gousses. De plus, grâce à ce tuteur naturel du pois, l'utilisation de fongicides est réduite et la récolte peut s'effectuer plus tardivement.

Le retour d'expérience allemande donne des résultats de rendements (q/ha) obtenus en cultures associées semblables à une culture simple de pois, voire supérieurs, comme le montre le tableau ci-contre (*Tableau 1*). En 2001, la culture de pois seule n'a pas pu être récoltée car elle s'est retrouvée totalement versée du fait des intempéries. En revanche, la culture de pois associée à la cameline a pu être récoltée, affichant même un très bon rendement. Ces résultats nous confirment que l'association des cultures aboutit à un rendement global supérieur à l'implantation d'une culture de pois classique.

En Rhône-Alpes, les cultures de colza et tournesol, seules cultures intéressantes pour la production de biocarburants, ne sont pas très développées en cultures associées, mais cette technique pourrait être envisagée pour faire coexister des cultures alimentaires et non alimentaires, dans un but d'optimisation des terres agricoles. Dans ce cas, des mêmes parcelles pourraient produire des cultures à des fins alimentaires ainsi que du colza ou du tournesol à but énergétique (huile végétale pure ou autre).

1.4 La Politique Agricole Commune

Mise en place en juillet 1962, la PAC vise à fixer l'ensemble des règles et mécanismes régissant la production, les échanges et le traitement des produits agricoles. Elle permet aussi :

- d'assurer un niveau de vie équitable aux agriculteurs de l'Union Européenne ;
- d'assurer la **compétitivité de l'agriculture** au niveau mondial ;
- de garantir la **sécurité des approvisionnements alimentaires** pour 452 millions de consommateurs européens ;
- de contribuer à l'**aménagement du territoire** et à la préservation de l'environnement.

Exemple Drôme	Montant de la partie couplée (€/ha) pour 2006
COP[8] *sec*	70,91
COP *irrigué*	119,75
blé dur	179,31
protéagineux *sec*	126,48
protéagineux *irrigué*	175,32
jachère	0
cultures énergétiques	115,91

Tableau 2 : Montant de l'aide PAC couplée en 2006 (€/ha).

[8] COP : Céréales et Oléo-Protéagineux.

À partir de la campagne 2006, le système de paiement des primes PAC change, passant d'une prime à l'hectare entièrement liée à la production à un découplage partiel de ces primes (pour les productions végétales : 75 % découplé et 25 % couplé à la production). Le montant de l'aide découplée (DPU[9]) sera calculé par exploitation en fonction d'une référence historique : 75% de la moyenne des aides perçues en 2000, 2001 et 2002. L'aide couplée reste, elle, liée à la culture mise en place (*Tableau 2*).

Le taux de jachère doit représenter au minimum 10 % de la SAU[10] de l'exploitation.

Pour la production de biocarburants, l'agriculteur peut mettre en place des cultures sur :

- les **jachères** sous forme de jachère industrielle contractualisée avec l'ONIOL[11] pour les oléagineux ;
- le **reste de la SAU** (SCOP[12]), en ayant droit à la partie couplée de l'indemnité PAC correspondante plus une Aide aux Cultures Énergétiques (ACE), ou « crédit carbone », de 45 €/ha (contrat avec l'ONIOL).

1.4.1 Comment utiliser la jachère pour la production de biocarburants sur l'exploitation ?

(ONIC-ONIOL, 2004 ; ONIOL, 2005)

En application de la réglementation communautaire, le producteur est autorisé à **transformer et à utiliser sur son exploitation** les graines de céréales ou d'oléagineux récoltées sur des terres dédiées au gel industriel. Ces graines peuvent être utilisées comme **combustibles** pour chauffer l'exploitation, pour la production **d'énergie**, de **biocarburants** ou de **biogaz**.

La mise en œuvre de cette disposition s'effectue par un engagement du demandeur à transformer directement la matière première sur son exploitation au travers d'un dossier rigoureux de suivi matière.

Il est important de préciser que la valeur économique des produits énergétiques issus de la transformation des graines doit être plus élevée que celle des sous-produits (cf. *4. Approche économique*).

[9] DPU : Droit à Paiement Unique.
[10] SAU : Surface Agricole Utile.
[11] ONIOL : Office National Interprofessionnel des Oléagineux, protéagineux et cultures textiles.
[12] SCOP : Surface en Céréales et Oléo-Protéagineux.

Une **déclaration de culture** engage l'agriculteur à utiliser ou à transformer directement la culture récoltée sur les terres en gel industriel. Cette déclaration de culture contient :

- un descriptif du lieu de stockage (obligatoirement sur l'exploitation) ;
- un descriptif du site de transformation ;
- un descriptif de l'utilisation finale envisagée ;
- un descriptif du matériel de transformation avec les caractéristiques techniques (presse de trituration, chaudière, moteurs fixes ou mobiles, utilisateurs de biocarburant,…) ;
- la preuve que le produit énergétique issu de la transformation a une valeur économique plus élevée que celle de tous les autres sous-produits issus de la même transformation.

Le producteur doit déposer une garantie de 250 €/ha (délivrée par un établissement financier habilité à se porter caution) auprès de l'ONIOL lorsque les graines obtenues sur le gel industriel ne font pas l'objet d'une dénaturation après récolte mais seulement au stade de l'huile issue de la première transformation (dans le cas d'une production d'huile énergétique par exemple). Cette caution est libérée au prorata des quantités transformées.

Le producteur envoie ensuite à l'ONIOL sa déclaration de récolte sur laquelle figurent les quantités de matières premières récoltées sur le gel industriel exprimées en poids brut, et le cas échéant les quantités de ces mêmes matières premières cultivées à des fins alimentaires et non alimentaires (cultures énergétiques). Ceci permet de vérifier que les quantités de matières premières du gel industriel correspondent à un rendement au moins égal au rendement moyen de son exploitation.

La dénaturation de la matière première, à l'état de graine, d'huile ou de plante entière est obligatoire. Elle se réalise par incorporation de 5 % de fioul domestique pour garantir l'utilisation des matières premières à des fins industrielles. Une seule opération de dénaturation est autorisée.

En cas de dénaturation au stade de l'huile, celle-ci doit intervenir dès le pressage des graines.

Enfin, le producteur doit tenir un registre de transformation et d'utilisation des matières premières (quantité de matières premières, quantité de sous-produits obtenus, dates de dénaturation…) en sachant que la transformation de la matière première doit intervenir avant le 31 juillet de la deuxième année suivant l'année de récolte.

Cette mesure, malgré une lourdeur administrative incontournable, permet à l'agriculteur de toucher la prime jachère tout en ayant le droit de produire des cultures à des fins énergétiques sur ses terres gelées.

1.4.2 Comment bénéficier de l'aide aux cultures énergétiques ?

(ONIC, ONIOL, 2004 ; ONIOL, 2005)

Depuis 2004, l'ONIC[13] et l'ONIOL permettent aux agriculteurs qui le souhaitent de bénéficier d'une aide aux cultures énergétiques de 45 €/ha, hors jachère, dans la limite d'une Surface Maximale Garantie communautaire (SMG) de 1,5 million d'hectares pour 2005 (en cas de dépassement de SMG[14], l'ACE[15] sera réduite au prorata).

L'ACE est consacrée aux agriculteurs qui destinent une partie de leur SAU à la **production d'énergie** (biocarburants, combustible, électricité…). L'aide n'est accordée que pour les superficies dont la production est couverte par un **contrat** entre l'agriculteur et l'entreprise de transformation. Dans le cas où la transformation est réalisée par l'agriculteur lui-même, une déclaration de culture est aussi nécessaire, tout en sachant que le stockage de la matière première et des produits obtenus doit obligatoirement être fait sur l'exploitation. Cet engagement de livraison sera vérifié sur la base d'un seul critère : le rendement moyen de l'exploitation pour la culture concernée.

Le producteur doit ensuite transmettre à l'ONIOL une déclaration de livraison de matières premières (obligatoire pour l'obtention de l'ACE) fournie par un collecteur agréé au moment de la récolte. Parallèlement, le collecteur lui adressera une déclaration de réception. Cette déclaration sera vérifiée sur la base du rendement moyen de l'exploitation pour la culture concernée.

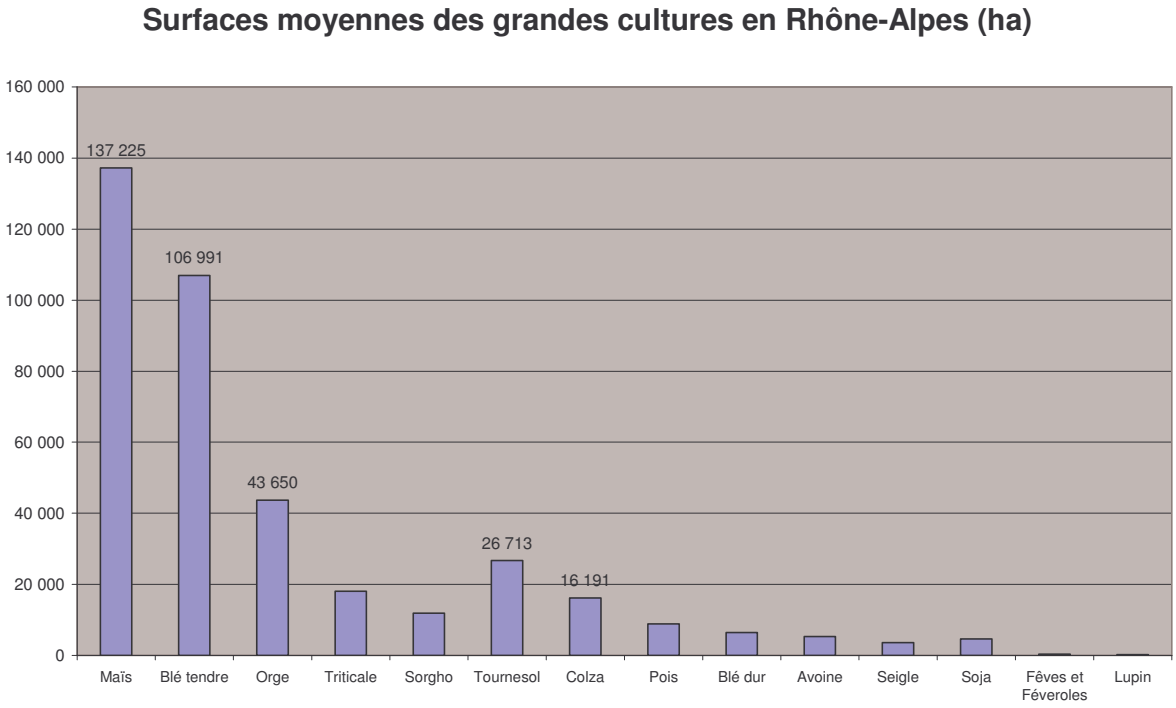
Le premier transformateur (ou l'agriculteur le cas échéant) doit déposer une caution de 60 €/ha auprès de l'ONIOL, et transformer toutes les quantités payées aux producteurs en cultures énergétiques avant le 31 juillet de la deuxième année suivant l'année de récolte (les produits énergétiques devant être obtenus par une chaîne de deux transformateurs maximum).

La dénaturation des matières premières, à l'état de graine, d'huile ou de plante entière, est obligatoire. Elle se réalise par incorporation de 5 % de fioul domestique ; en cas de dénaturation au stade de l'huile, celle-ci doit intervenir dès le pressage des graines.

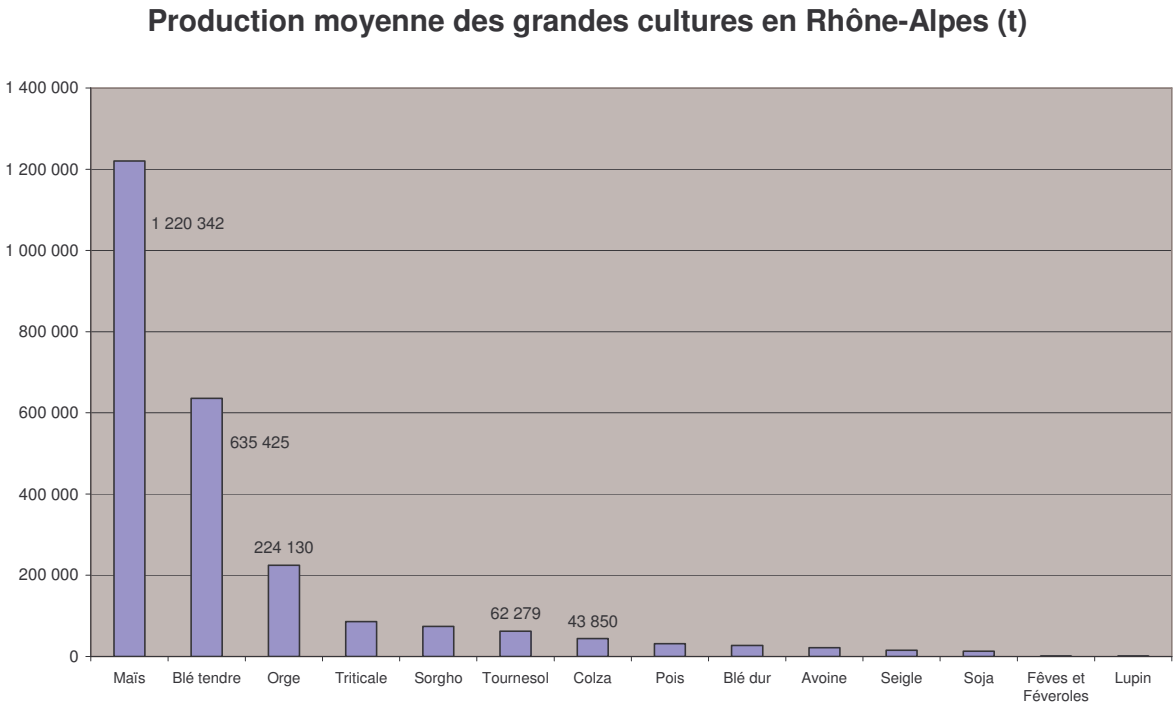
La caution sera rendue au premier transformateur après complète transformation en produit énergétique, une preuve de transformation devant être fournie à l'ONIOL par celui-ci au plus tard le 31 juillet de la troisième année suivant l'année de récolte.

En termes de primes, l'agriculteur perçoit les primes classiques de la culture mise en place plus les 45 €/ha de l'ACE (dans la limite de la SMG).

[13] ONIC : Office National Interprofessionnel des Céréales.
[14] SMG : Surface Maximale Garantie.
[15] ACE : Aide aux Cultures Énergétiques.



Graphique 1 : Surfaces moyennes des grandes cultures en Rhône-Alpes (ha).



Graphique 2 : Production moyenne des grandes cultures en Rhône-Alpes (t).

1.5 Surfaces et volumes actuels des grandes cultures en Rhône-Alpes

(ONIC-ONIOL, 2005 ; ONIOL, 2004)

La SCOP de la région Rhône-Alpes représente actuellement 383 517 hectares (*Graphique 1*), pour une production totale toutes cultures confondues de 2 455 708 tonnes[16] (*Graphique 2*). La culture prédominante est le maïs avec 137 225 hectares, soit 35 %, pour une production moyenne annuelle de 1 220 342 tonnes. Le blé vient en deuxième position avec 106 991 hectares (27 %), pour une production moyenne annuelle de 635 425 tonnes.

Les principaux oléagineux, que sont le tournesol et le colza, n'arrivent respectivement qu'en sixième et septième position, avec 26 713 hectares (7 %) soit 62 279 tonnes (2,5 %) pour le tournesol, et 16 191 hectares (4 %) soit 43 850 tonnes (2 %) de colza. Les surfaces consacrées aux colza et tournesol énergétique sont respectivement de 6 148 et 2 295 hectares.

En termes d'évolution, on remarque que la SCOP de Rhône-Alpes a diminué de 6 % entre 1998 et 2005, passant de 408 176 à 383 517 hectares.

1.5.1 Le colza

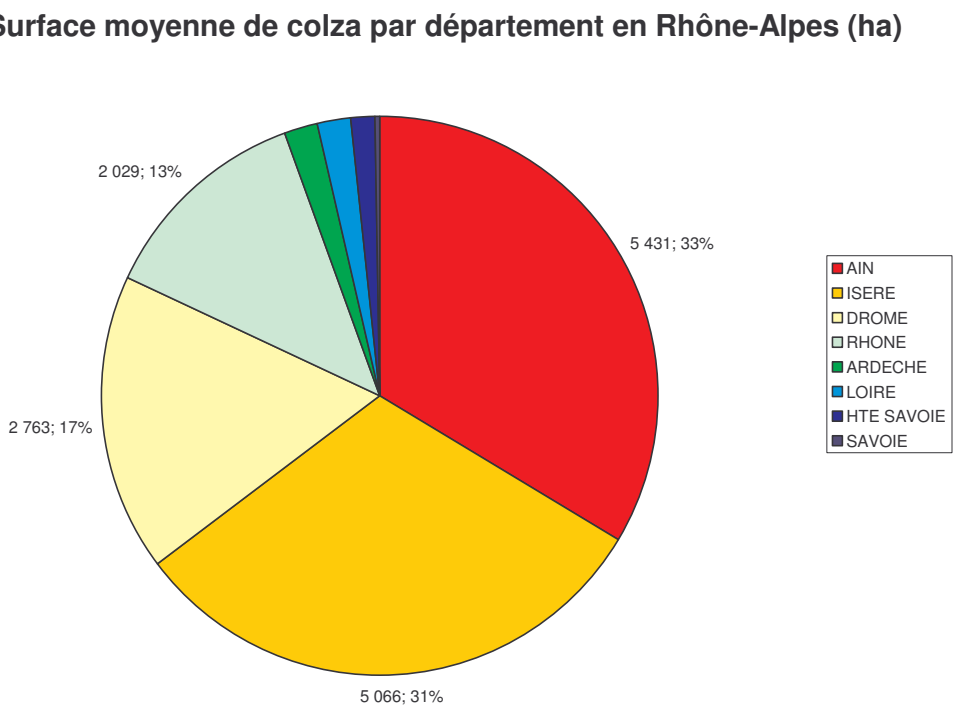
L'Ain est le plus gros département producteur de colza, avec 5 431 hectares (33 % de la surface régionale en colza), ce qui représente une production de 15 864 tonnes (37 %). L'Isère arrive en deuxième position (31 % de la surface), suivie par la Drôme (17 %) et le Rhône (13 %) (*Graphique 3*).

En production industrielle, l'Ain représente encore la plus grosse production de la région avec 2 843 hectares (soit 52 % de sa surface en colza), devant l'Isère (1 815 ha), le Rhône (658 ha) et la Drôme (542 ha).

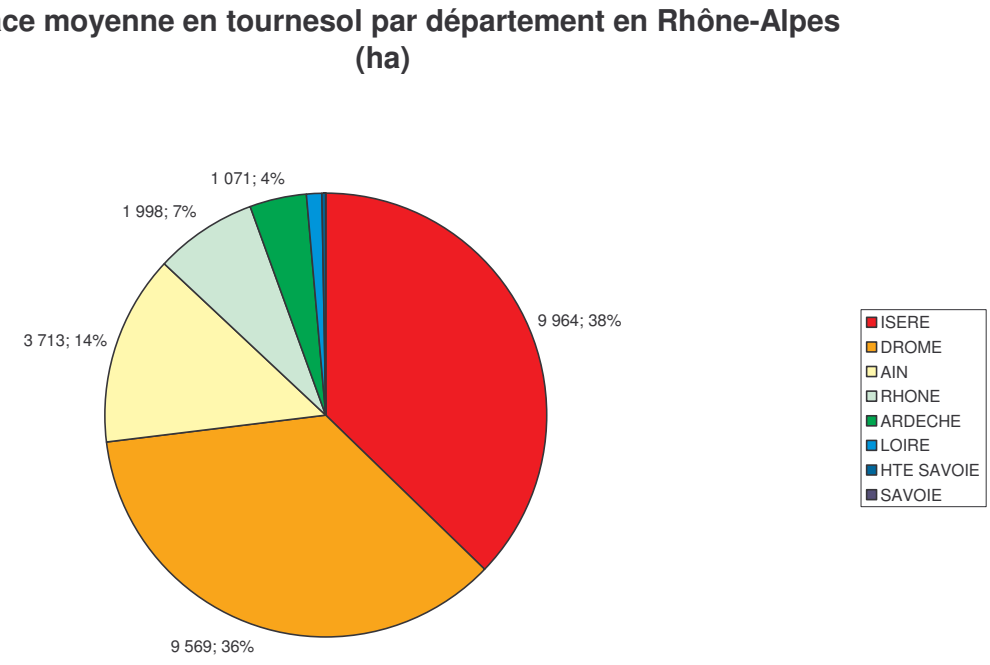
L'évolution des surfaces régionales en colza est en légère diminution sur la période 1998 - 2005, passant de 17 012 à 13 520 hectares (-20,5 %) pour le colza total, et de 7 344 à 5 589 hectares (-24 %) pour le colza industriel.

On peut remarquer que cette tendance de régression des surfaces en colza (alimentaire et non alimentaire) est générale en Rhône-Alpes. Le colza non alimentaire est en plus forte baisse, on peut imputer ceci au fait que le taux de jachère soit passé de 10 à 5 % en 2004.

[16] Les chiffres cités sont issus des données ONIOL, ce sont des moyennes pour les campagnes 1998 à 2005.



Graphique 3 : Surface moyenne de colza par département en Rhône-Alpes (ha).



Graphique 4 : Surface moyenne en tournesol par département en Rhône-Alpes (ha).

1.5.2 Le tournesol

La plus grosse production de tournesol est réalisée en Isère avec 27 626 tonnes (soit 42 % de la production régionale), ce qui occupe une surface de 9 964 hectares (38 %). La Drôme se retrouve juste derrière (36 % de la surface), tandis que l'Ain (14 %) et le Rhône (7 %) ne comptent que très peu de surfaces en tournesol (*Graphique 4*).

Le tournesol destiné à la production industrielle est quant à lui très peu représenté. En effet, l'Isère en produit sur 868 hectares, soit seulement 9 % de sa surface emblavée en tournesol. La Drôme en compte 603 hectares, l'Ain 566 hectares et le Rhône 208 hectares.

Les surfaces en tournesol de la région sont en légère diminution sur la période 1998 - 2005, passant de 31 718 à 22 210 hectares (-30 %) pour le tournesol total, et de 2 481 à 844 hectares (-66 %) pour le tournesol industriel.

Les surfaces en tournesol sont plus en baisse que celles en colza sur Rhône-Alpes. Pour le tournesol industriel, on remarque une chute importante de surface entre 2003 et 2004 (passant de 2 487 ha en 2003 à 844 ha en 2004) ; cette diminution peut s'expliquer par la diminution du taux de jachère de 10 à 5 % en 2004, et du fait que la culture de colza industriel reste privilégiée par rapport au tournesol industriel.

Quant à la baisse des surfaces de tournesol alimentaire (moins 9 508 ha entre 1998 et 2005), elle s'explique par deux phénomènes : tout d'abord la baisse générale de la SCOP rhônalpine (moins 24 659 ha entre 1998 et 2005), mais aussi par la diminution de la prime PAC pour le tournesol qui a amené les agriculteurs à s'orienter vers d'autres cultures (céréales à pailles et maïs principalement).

1.5.3 Production, utilisation, importation et exportation d'oléagineux en France

(PROLEA, 2004)

Sur une moyenne de 1998 à 2003, la production française de graines de colza s'est élevée à 3 561 800 tonnes, la production de tournesol a été, elle, de 1 662 000 tonnes. En Rhône-Alpes, la production de colza et tournesol, pour cette période, représente respectivement 1,7 % et 4 % de la production totale française.

Les oléagineux alimentaires peuvent servir à la trituration ou être incorporés en graines entières pour l'alimentation animale. En 2002, le colza représentait 45 % (1 474 000 t) de la trituration française et le tournesol 30 % (987 000 t).

Pour la campagne 2002-2003, 96 000 tonnes de colza et 2 000 tonnes de tournesol ont été utilisées en graines entières pour l'alimentation animale.

La trituration française est en augmentation depuis 1992 de par une demande mondiale en huile très soutenue. Le taux de grains incorporés dans l'alimentation animale suit le cours des graines : plus la graine est chère, plus l'utilisation directe pour le bétail diminue.

En ce qui concerne le commerce d'oléagineux, la France est exportatrice nette de graines, mais elle exporte du colza et importe du soja (la plus grosse part arrive sous forme de tourteaux).

Année 2003	**Importation**	**Exportation**	**Balance (E-I)**
Colza	11 000 t	1 705 000 t	1 694 000 t
Tournesol	296 000 t	283 000 t	- 13 000 t
Soja	827 000 t	28 000 t	- 799 000 t
Total	**1 134 000 t**	**2 016 000 t**	**882 000 t**

Tableau 3 : Quantités d'oléagineux importées et exportées en France en 2003. ***(PROLEA, 2004)***

Consommation de l'agriculture en Rhône-Alpes en 2002		
Unité	*kTEP*[17]	*Litres*
	Fioul domestique	Fioul domestique
Ain	11,9	14 166 950
Ardèche	8,6	10 238 300
Drôme	15,5	18 452 750
Isère	16,3	19 405 150
Loire	11,7	13 928 850
Rhône	11,9	14 166 950
Savoie	5,9	7 023 950
Haute Savoie	7,4	8 809 700
Rhône-Alpes	**89,2**	**106 192 600**

Tableau 4 : Consommations totales en fioul domestique de l'agriculture en Rhône-Alpes en 2002. ***(EXPLICIT-ICE, 2004)***

Consommation de l'agriculture en Rhône-Alpes en 2002		
Consommation 2002	*Litres*	*Litres*
	Fioul domestique total	Fioul tracteur
Ain	14 166 950	12 976 926
Ardèche	10 238 300	9 378 283
Drôme	18 452 750	16 902 719
Isère	19 405 150	17 775 117
Loire	13 928 850	12 758 827
Rhône	14 166 950	12 976 926
Savoie	7 023 950	6 433 938
Haute Savoie	8 809 700	8 069 685
Rhône-Alpes	**106 192 600**	**97 272 421**

Tableau 5 : Consommations des tracteurs agricoles en fioul domestique en Rhône-Alpes en 2002. ***(EXPLICIT-ICE, 2004 ; AGRESTE, 1993)***

[17] kTEP : kilo Tonne Équivalent Pétrole.

Sur une moyenne de 1998 à 2003, la production française totale (SCOP + industrielle) de tournesol et de colza est de 5 223 800 tonnes (3 561 800 t de colza et 1 662 000 t de tournesol). La production rhônalpine de colza et tournesol représente donc 2,4 % (127 034 t) de la production française. La balance export / import de colza et tournesol est positive de 1 681 000 tonnes, soit 32 % de la production française (*Tableau 3*).

1.6 Surfaces et volumes potentiels pour l'HVP en Rhône-Alpes

1.6.1 Consommation actuelle de fioul dans l'agriculture en Rhône-Alpes

L'agriculture rhônalpine consomme 106 millions de litres de fioul (*Tableau 4*), 92 % sont destinés au carburant des tracteurs ce qui représente pour Rhône-Alpes 97 millions de litres de fioul (*Tableau 5*). *(AGRESTE, 1993)*

1.6.2 Transfert de surfaces à destination de l'HVP

Comme nous l'avons vu, les surfaces rhônalpines sont actuellement pour le colza de 16 191 hectares[18] en alimentaire et 6 148 hectares en industriel (soit 22 339 ha de colza au total). Le tournesol représente, lui, 26 713 hectares de SCOP et 2 295 hectares de gel industriel (soit 29 008 ha de tournesol au total).

La sole oléagineuse a atteint un maximum à la fin des années 80 (1989), avec près de 81 000 ha (colza, tournesol et soja confondus) *(AGRESTE, 2005)*. Cependant, la culture de soja n'est pas en voie de reprendre les surfaces qu'elle couvrait auparavant (problèmes de prix par rapport au maïs, de rendement et de prime PAC). L'**hypothèse** de l'utilisation potentielle d'oléagineux à destination d'HVP peut se calculer à partir d'un maximum de 76 140 hectares (81 000 ha moins les 6 % de diminution de SCOP entre 1998 et 2005) de colza et tournesol potentiels en Rhône-Alpes (SCOP + jachère).

Actuellement, le marché alimentaire et industriel d'oléagineux en Rhône-Alpes représente 51 347 hectares. La filière Diester®, avec la mise en place de l'usine d'estérification de Sète, devrait appeler au minimum près de 8 000 hectares supplémentaires de colza et tournesol rhônalpins. Nous pouvons donc faire l'hypothèse que les surfaces destinées à la production d'HVP pourraient atteindre 16 800 hectares.

Comme nous l'avons vu, la production d'oléagineux en région Rhône-Alpes ne représente que 1,7 % pour le colza et 4 % pour le tournesol de la production française. On peut donc penser que si les filières EMHV et HVP devenaient plus intéressantes pour les agriculteurs (vis-à-vis du marché alimentaire et du prix du fioul, mais aussi vis-à-vis des autres productions), alors ceux-ci pourraient produire plus d'oléagineux à destination énergétique.

[18] Moyenne des surfaces entre 1998 et 2005

TRANSPORT en Rhône-Alpes	Consommation *2002 (L)*
Gazole	3 789 718 650
Fioul	10 714 500

Tableau 6 : Consommations de gazole et de fioul par les transports en Rhône-Alpes en 2002. ***(EXPLICIT-ICE, 2004)***

Nous savons aussi que 32,2 % de la production française de colza et tournesol est destinée à l'exportation. Ainsi, 14 076 tonnes de colza (soit 5 200 ha) et 19 783 tonnes de tournesol (soit 8 600 ha) destinées à l'alimentaire en Rhône-Alpes pourraient potentiellement être transférées pour la production d'HVP. Cette estimation peut être vue comme une hypothèse « haute » de colza et tournesol alloués à l'HVP. Partant toujours sur le principe de ne pas concurrencer la filière Diester® mise en place, les surfaces « HVP » pourraient être de 30 600 hectares.

En résumé, nous obtenons donc une hypothèse « basse » de 16 800 hectares et une hypothèse « haute » de 30 600 hectares de surfaces potentiellement transférables en HVP.

Si on définit arbitrairement un rendement moyen de 25 quintaux par hectare (rendement moyen régional 1998-2005 entre colza (27 q/ha) et tournesol (23 q/ha)) pour les cultures, et un rendement de pressage de 33 %, l'hypothèse « basse » permettrait une production de 15 millions de litres d'HVP, et l'hypothèse « haute » génèrerait 27,5 millions de litres d'HVP.

Avec une consommation de fioul carburant de 97 millions de litres pour les tracteurs agricoles, ces productions d'HVP permettraient de substituer au minimum 15 % du fioul consommé et au maximum 28 %.

Ces chiffres montrent nettement que **la production d'huile végétale pure ne permettra même pas à l'agriculture de substituer l'intégralité de sa consommation de fioul carburant par de l'HVP.**

Hors secteur agricole, le tableau ci-contre (*Tableau 6*) nous montre la consommation de carburant de la région. Comme nous l'a démontré le calcul de substitution possible du fioul agricole par de l'HVP, ce taux reste inférieur à 30 % au mieux. En prenant l'hypothèse « haute » d'une production de 27,5 millions de litres d'HVP, la substitution du gazole et du fioul destinés au transport par de l'HVP ne dépasserait pas les 1 % (0,7 %) !

Tout ceci montre clairement que l'huile végétale pure est un carburant qui peut techniquement se substituer au fioul et au gazole, mais il ne faut pas perdre de vue que les surfaces d'oléagineux à destination de la production d'HVP à grande échelle sont une limite de la filière. Il serait irréaliste de vouloir faire carburer tout le parc diesel automobile de la région Rhône-Alpes à l'HVP. L'autoconsommation sur les exploitations agricoles semble plus logique et permettrait aux agriculteurs de trouver une certaine autonomie énergétique (carburant et tourteaux pour les exploitations mixtes) accompagnée d'une valeur ajoutée supplémentaire.

De même, l'HVP pourrait être un vecteur de développement d'une filière micro-économique locale où l'agriculteur producteur d'huile serait l'acteur principal. Ce système permettrait de par ces filières locales l'approvisionnement en huile de collectivités, particuliers, agriculteurs… Malgré des capacités de production réduites, l'HVP pourra être une alternative limitée mais crédible à l'utilisation de gazole sur des territoires donnés.

La valorisation de l'huile végétale pure comme carburant (ou combustible) et de ces coproduits (cf. *3.3 Tourteaux gras*) présente plusieurs avantages dont :

- la **diversification du revenu** de l'exploitation agricole (et donc la sécurisation des ressources), dans le cadre d'une niche de marché ;
- une **image positive auprès du public**, véhiculée par le rôle écologique de l'agriculture productrice d'une énergie renouvelable ;
- la **dynamisation de l'ancrage territorial de l'agriculture** au niveau économique et social (production de valeur ajoutée locale, création d'emploi, partage de valeurs).

2 LA TRANSFORMATION DES OLÉAGINEUX

2.1 Propriétés physiques, chimiques et biologiques des graines

(JOYE P., 2003)

Les graines d'oléagineux peuvent être caractérisées par différents paramètres d'ordre physique, chimique et biologique.

2.1.1 Caractéristiques physiques

Il s'agit de l'humidité, de la teneur en impuretés, de la température et du poids spécifique.

2.1.1.1 Humidité

L'humidité de la graine est dépendante de la maturité de la culture à la récolte et des conditions dans lesquelles celle-ci est réalisée. Pour assurer une bonne conservation des graines, la teneur en eau doit être la plus faible possible, c'est-à-dire au maximum 9%.

La teneur en eau et en matières volatiles, en pourcentage en masse de l'échantillon de départ, est égale à :

$$\textbf{Humidité (\%)} = \frac{\textbf{100 x (m1-m2)}}{\textbf{(m1-m0)}}$$

avec : **m0** = masse du pèse filtre (g) ;
m1 = masse du pèse filtre avec échantillon avant dessiccation (g) ;
m2 = masse du pèse filtre avec échantillon après dessiccation (g).

Dans le négoce, l'humidité maximum autorisée est de 9%. Lorsque cette valeur est dépassée, une réfaction en prix puis en poids est appliquée au moyen d'un barème interprofessionnel, et une ventilation plus un séchage doivent théoriquement être effectués.

Paramètres	Norme	Expression
humidité	9 %	% sur brut
impuretés	2 %	% sur brut
teneur en huile	40 %	% sur poids aux normes
teneur en acide érucique	2 %	% huile
teneur en glucosinolates	25	µmoles/g de graines
acidité oléique	2 %	% sur poids aux normes

Tableau 7 : Normes de base pour la commercialisation du colza.

2.1.1.2 Teneur en impuretés

On entend par impuretés tous les corps étrangers, organiques et non organiques, se trouvant dans l'échantillon à analyser, autres que les graines de colza ou tournesol. Ces impuretés se répartissent en plusieurs catégories : de petites pierres, de la terre, des débris de bois, des débris de la plante (morceau de tige ou de silique) ou d'autres plantes, des graines oléagineuses ou non.

La teneur en impuretés, exprimée en pourcentage en masse de l'échantillon de départ, est égale à :

$$\text{Impuretés (\%)} = \frac{100 \times (a-c)}{a}$$

avec : **a** = masse de l'échantillon avant nettoyage ;
c = masse de graines nettoyées.

Dans le négoce, les normes de réception fixent un taux forfaitaire de 2%. Au delà de cette valeur, un coût de triage pourra être facturé et le poids brut sera ramené en poids aux normes par ce même barème interprofessionnel.

2.1.1.3 Température et poids spécifique

Aucune norme n'existe dans le négoce pour ces deux paramètres. Néanmoins, il est conseillé, en ce qui concerne la température, d'abaisser celle-ci le plus rapidement possible après la récolte pour diminuer l'activité biologique des graines et ainsi favoriser leur conservation.

Le poids spécifique est la masse d'un volume mesuré de graines, exprimé en kilogrammes par hectolitre.

2.1.2 Caractéristiques chimiques

Pour les caractéristiques exprimant des teneurs (matières grasses, protéines et glucosinolates), plusieurs modes d'expression sont parfois proposés : en % de la matière sèche (MS), en % de la matière sèche déshuilée et en % aux normes de commercialisation (*Tableau 7*).

2.1.2.1 Teneur en matières grasses

La teneur en matières grasses est un paramètre important pour les oléagineux. Pour l'industrie, en effet, l'huile représente un produit à plus forte valeur ajoutée que le tourteau. Des normes de commercialisation de teneurs en matières grasses de 40 % pour le colza et 44 % pour le tournesol permettent aux organismes stockeurs d'instituer éventuellement au niveau des agriculteurs un système de bonus/malus à partir de ces normes.

Acide gras		Teneur (%)
palmitique	C16	4,1
palmitoléique	C16 :1	0,3
stéarique	C18	1,6
oléique	C18 :1	63 ,8
linoléique	C18 :2	19,4
linolénique	C18 :3	8,6
arachidique	C20	0,6
hadoléique	C20 :1	1,3
béhénique	C22	0,3
érucique	C22 :1	ND

ND : non détectable

Tableau 8 : Profil en acides gras du colza.

On entend par matières grasses, la totalité des substances extraites par un solvant approprié (n-hexane). Le pourcentage de matières grasses est égal à :

$$\textbf{Matières grasses (\%)} = \frac{\textbf{100 x m}}{\textbf{e}}$$

avec : **m** = masse de matières grasses extraites ;
e = masse de l'échantillon de départ.

Ce pourcentage est donc exprimé en fonction de la matière sèche. L'huile ainsi obtenue peut servir pour une détermination du profil en acides gras, tandis que le résidu de l'échantillon, une fois séché, permettra la détermination du taux de protéines et du profil en acides aminés.

2.1.2.2 Profil en acides gras

Outre la teneur en matières grasses, la composition de celles-ci est également très importante. Ainsi, certains composés sont particulièrement recherchés par l'industrie et certaines variétés sont spécialement développées pour leur teneur en tel ou tel acide gras.

De plus, le profil en acides gras donne des informations sur les potentialités d'oxydation de l'huile (présence d'acides gras insaturés), sur sa viscosité ou sa valeur alimentaire. Enfin, par l'étude de ce profil, on peut repérer la présence ou l'absence de composés indésirables (par exemple, l'acide érucique C22:1 pour l'alimentation).

Le tableau ci-contre (*Tableau 8*) donne une composition moyenne en acides gras de graines de colza.

2.1.2.3 Teneur et profil en glucosinolates

Contrairement au tournesol, le colza présente de nombreux facteurs antinutritionnels, dont les glucosinolates et leurs dérivés qui risquent le plus de poser problème.

Ce ne sont pas les glucosinolates eux-mêmes qui peuvent s'avérer gênants en alimentation, mais leurs dérivés. En effet, les glucosinolates peuvent être dégradés en divers composés dont les plus importants sont, dans le cadre de l'alimentation animale, les ions thiocyanates, les oxazolidinethiones et dans une moindre mesure les isothiocyanates et les nitriles.

Les dérivés des glucosinolates présents dans le sang peuvent agir sur les tissus, y être stockés ou être éliminés, notamment par voie urinaire et par le lait.

Les principaux effets ont été constatés chez l'animal au niveau de la thyroïde en provoquant une augmentation de celle-ci (goitre). À forte concentration, les ions thiocyanates entrent en compétition avec l'iode dont la fixation par la glande diminue. L'importance de ce phénomène dépend de l'espèce et de l'âge de l'animal ainsi que des quantités absorbées. Ainsi, elle sera moins fréquente chez le ruminant que chez le monogastrique, il en sera de même chez l'adulte par rapport au jeune.

Des effets sur le foie (hypertrophie), sur les reins ou les glandes surrénales peuvent également apparaître et auraient pour origine certains nitriles ou isothiocyanates. Cependant, certains dérivés peuvent avoir un effet bénéfique au niveau hépatique en augmentant la synthèse des enzymes détoxifiantes capables de provoquer une destruction plus rapide des aflatoxines[19].

Tout au long des recherches ayant pour but une amélioration qualitative mais aussi quantitative du colza, les sélectionneurs ont cherché à diminuer la teneur en glucosinolates présents dans les graines. Avec l'apparition des **variétés 00** (double zéro : faible teneur en acide érucique < 0,5 % ; faible teneur en glucosinolates < 25 µmoles/g), les teneurs actuelles se situent généralement sous les 20 µmoles/g de graines (basse teneur) et approchent, suivant les variétés, des valeurs de 10 µmoles/g de graines (très basse teneur). Si les concentrations de ces substances ont été fortement réduites, elles sont néanmoins encore présentes et peuvent dans certains cas poser problème.

Un autre effet majeur des glucosinolates est la baisse d'appétence chez certains animaux. Ainsi, une ingestion trop élevée de glucosinolates peut avoir comme conséquences une baisse des quantités d'aliments ingérés par les animaux, des effets sur la croissance et sur la qualité des carcasses, sur les performances de reproduction (baisse de la fertilité ou augmentation des mortalités embryonnaires) ou sur la production et la composition du lait.

2.1.2.4 Teneur en protéines et profil en acides aminés

Pour une utilisation en alimentation animale, la teneur en protéines et dans une moindre mesure le type d'animaux concernés (volailles, porcs, bovins viande, vaches laitières,…) sont des renseignements importants pour pouvoir dresser un tableau de la valeur nutritive de l'aliment (graines entières ou tourteaux).

La détermination approximative de la teneur en protéines brutes se fait par analyse de la teneur en azote sur un échantillon de farine déshuilée et séchée. La teneur en azote est ensuite multipliée par un facteur 6,25 pour estimer le pourcentage en protéines.

La quantification des acides aminés totaux (sauf cystéine, méthionine et tryptophane) se fait après hydrolyse acide. Les acides aminés soufrés (cystéine et méthionine) sont oxydés avant l'hydrolyse. La teneur en tryptophane est obtenue après hydrolyse basique.

2.1.3 Caractéristiques biologiques

Ceci concerne essentiellement la présence d'insectes dans la récolte. Ces insectes peuvent être des insectes courants telles les coccinelles, ou plus spécifiques à la culture de colza (altises par exemple).

Si la présence d'insectes peut poser problème lors de la réception de la récolte chez les négociants ou lors du transfert vers le triturateur qui entend recevoir un produit de qualité saine et loyale, elle ne pose en général aucun problème pour la conservation de la récolte, les insectes disparaissant d'eux-mêmes après quelques jours.

Nous allons maintenant aborder deux débouchés énergétiques, industriels ou non, de ces graines d'oléagineux : l'H.V.P. et l'E.M.H.V (ou biodiesel).

[19] Aflatoxine : mycotoxine fortement toxique et potentiellement cancérigène que l'on retrouve dans les aliments conservés longtemps dans de mauvaises conditions.

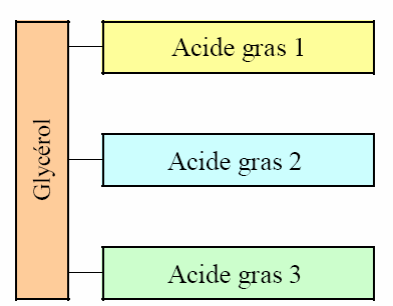


Figure 1 : Structure d'un triglycéride. ***(JOYE P., 2003)***

2.2 L'Huile Végétale Pure

2.2.1 Propriétés physiques et chimiques de l'huile

(JOYE P., 2003)

2.2.1.1 Caractéristiques chimiques

Le facteur le plus important est la composition en acides gras de l'huile. Cependant, en fonction de l'utilisation prévue, et notamment l'utilisation carburant, d'autres caractéristiques peuvent également être importantes.

☆ ***Teneur en matières grasses et profil en acides gras***

Nous avons vu précédemment que la teneur en matières grasses et le profil des acides aminés constituant cette matière grasse étaient des caractéristiques importantes d'une graine de colza.

Nous allons nous intéresser plus particulièrement ici à la structure et à la composition de cette matière grasse. Les huiles sont essentiellement (>95%) composées de triglycérides, dont la structure chimique comporte un glycérol et trois acides gras (*Figure 1*). Le reste est composé de phosphatides, stérols, alcools… qui peuvent influencer les caractéristiques de l'huile (odeur, couleur).

C'est la composition d'une huile en acides gras qui lui confère ses qualités nutritionnelles, ses particularités et sa texture.

♦ ***Les acides gras saturés***

Ils ne possèdent pas de double liaison dans leur chaîne carbonée. Ils sont présents notamment dans les graisses animales et dans les graisses végétales en diverses proportions. C'est la teneur en ces acides gras qui détermine la texture de l'huile : une huile riche en acides gras saturés sera solide aux températures normales (beurre, saindoux…).

♦ ***Les acides gras insaturés***

Ils présentent quant à eux une ou plusieurs doubles liaisons dans leur chaîne carbonée, on parle alors d'acides gras mono-insaturés ou poly-insaturés. On trouve ces acides gras insaturés en grande partie dans les huiles végétales. L'acide gras mono-insaturé le plus courant comporte 18 atomes de carbone, il s'agit de l'acide oléique (C18:1). Les deux principaux acides gras poly-insaturés des huiles sont l'acide linoléique (18 atomes de carbone et 2 doubles liaisons : C18:2) et l'acide α-linolénique (C18:3). Ce sont ces acides et l'équilibre entre eux qui sont considérés comme des facteurs de santé.

En raison de leur teneur élevée en acides gras à longue chaîne, l'huile de tournesol et surtout l'huile de colza font partie des huiles végétales les plus résistantes à l'oxydation. La teneur élevée de l'huile de colza en vitamine E (antioxydant) renforce encore cette résistance.

Le profil en acides gras est identique à celui obtenu pour la caractérisation des graines (*Tableau 8*).

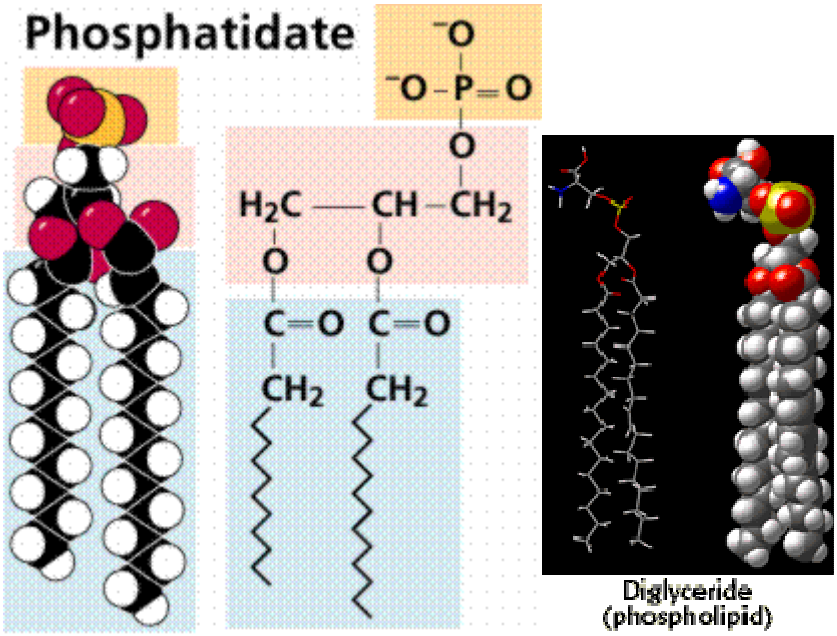


Figure 2 : Sructure d'un phospholipide. ***(CARRÉ P., 12/05/2005)***

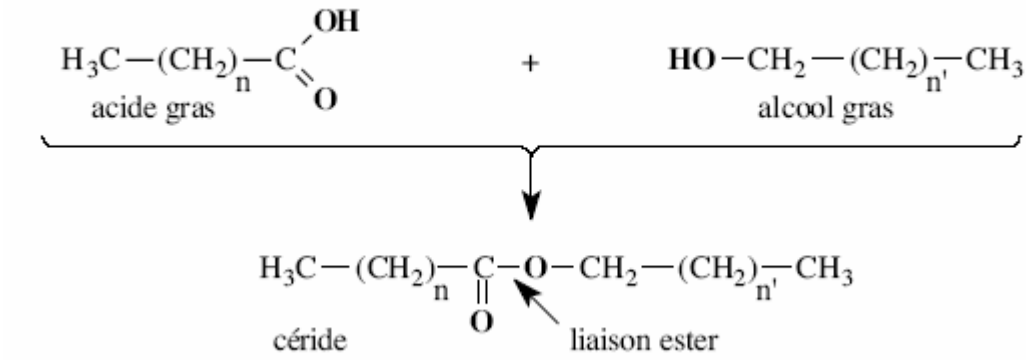


Figure 3 : Formation d'une liaison ester. ***(CARRÉ P., 12/05/2005)***

✯ *Teneur en soufre (S)*

Dans les cas où l'huile subit une combustion (carburant, combustible), cette teneur en soufre a toute son importance. Ainsi, à l'heure où la teneur en soufre des différents carburants est imposée à la baisse (cf. *annexe 2 Les normes du gazole et du fioul*), il est important de noter que la teneur en soufre d'un biocarburant comme l'huile végétale pure s'inscrit dans cette perspective de baisse des teneurs en soufre.

Le soufre présent dans le carburant contribue à l'émission de particules et de dioxyde de soufre par l'échappement, ainsi qu'à la formation de dépôts acides dans l'huile lubrifiante. De plus, ce soufre réduit le fonctionnement des catalyseurs.

Les teneurs mesurées sur des huiles produites à la ferme se situent sous la barre des 20 ppm[20].

✯ *Teneur en phosphore (P)*

La teneur en phosphore, indicateur de présence de phospholipides, est également importante en usage carburant. En effet, ces phospholipides sont montrés du doigt lors de certains problèmes d'encrassement des soupapes et de la chambre de combustion des cylindres lors de l'utilisation d'huile végétale carburant (phénomène de gommage).

Les graines de colza et tournesol contiennent des teneurs importantes de phosphore. Cet élément est entraîné en plus ou moins grande quantité avec l'huile lors de l'opération de trituration en fonction de la méthode utilisée.

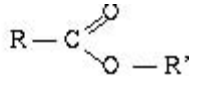
Les phospholipides sont des diglycérides comportant un atome de phosphore et ont pour principale caractéristique de comporter un pôle hydrophile et un pôle hydrophobe (*Figure 2*). Ils sont un constituant important des membranes cellulaires.

✯ *Teneur en cires*

Uniquement présentes dans l'huile de tournesol, les cires sont principalement constituées de cérides, c'est-à-dire de monoesters d'acides gras (C14 à C28) et d'alcools aliphatiques (C14 à C32) à longue chaîne. Ces alcools gras sont en général des alcools primaires, à nombre pair de carbones, saturés et non ramifiés, avec la même chaîne carbonée que les acides gras, mais le groupement acide (COOH) est remplacé par un groupement alcool (OH).

Les acides gras à l'état libre sont des composés très réactifs. Ils se combinent au glycérol par estérification, c'est-à-dire par formation de liaisons chimiques de type ester (*Figure 3*).

On peut résumer la composition chimique des cires par :

Ester 

R symbolise le reste de l'acide gras. Dans le cas des cires, le glycérol est remplacé par un alcool gras.

Figure 4 : Structure des cires. ***(CARRÉ P., 12/05/2005)***

[20] ppm : Parties Par Million (= mg/kg = g/t…).

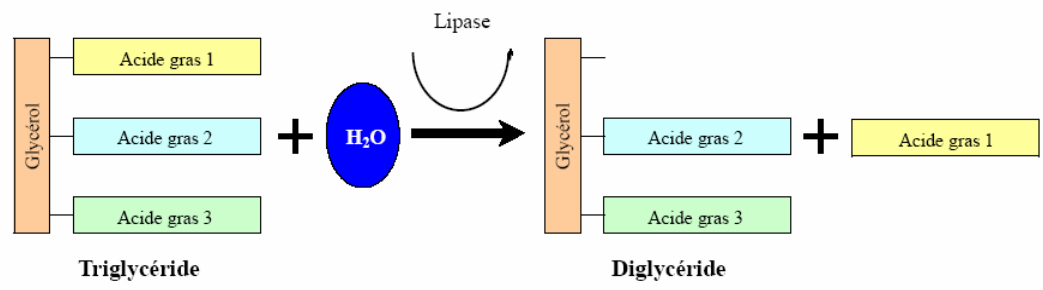


Figure 5 : Hydrolyse d'un triglycéride. ***(JOYE P., 2003)***

On sépare les cires en deux catégories selon leur longueur de chaîne : les cires non cristallisables et les cires cristallisables.

♣ **Les cires non cristallisables**

Leur chaîne est inférieure à 42 atomes de carbone et elles ne cristallisent pas dans l'huile à température ambiante, elles ne sont donc pas responsables de la mauvaise tenue au froid.

♣ **Les cires cristallisables**

Leur chaîne est supérieure à 42 atomes de carbone, elles cristallisent à température ambiante et sont donc responsables de la mauvaise tenue au froid de l'huile. Ces cires donnent une propriété particulière à l'huile de tournesol : la **siccativité**, qui pourra être gênante, comme nous le verrons plus loin, lors de l'utilisation en carburation.

☆ *Résidu de carbone Conradson*

Le résidu en carbone Conradson correspond à la quantité de matières charbonneuses après évaporation de l'échantillon porté à ébullition. S'il y a combustion, on parle de teneurs en cendres.

Il y a une forte corrélation entre la valeur de ce paramètre et les résidus qui peuvent être retrouvés au niveau de la chambre de combustion, des segments et des soupapes. Un niveau faible de résidu en carbone permet de garder le moteur dans un état optimal de propreté. Cette valeur devra donc être la plus basse possible.

☆ *Teneur en cendres*

Les cendres (oxydées et brutes) ont un pouvoir abrasif qui doit être limité pour éviter des problèmes au niveau de la pompe à injection, des injecteurs et des cylindres.

☆ *Teneur en eau*

La présence d'eau dans le carburant, quel qu'il soit, pourra poser des problèmes tout au long du circuit de carburant (réservoir, filtre…). Cependant, dans le cas de d'huile, cette présence d'eau n'est pas nécessairement un désavantage si elle se présente sous forme d'émulsion avec l'huile, forme qui est cependant instable dans le temps.

☆ *Indice d'acide (ou acidité oléique)*

L'huile contenue dans les graines oléagineuses contient naturellement des acides gras libres, en quantité d'autant plus grande que la graine a été altérée par les conditions agro-climatiques de la récolte ou les conditions de séchage et de stockage.

Sous l'action d'une enzyme, la lipase, les triglycérides libèrent leurs acides gras, provoquant l'acidification de l'huile (*Figure 5*). Les graines contiennent des lipases endogènes, mais ce sont des lipases de micro-organismes associés aux graines qui sont responsables des accidents de conservation. Lorsque des graines s'acidifient, la quantité d'huile consommable que l'on peut en tirer diminue. De plus, les traitements de fabrication deviennent plus délicats à mettre en œuvre : difficultés de trituration, baisse du rendement en huile, pertes au raffinage accrues, risques de rancissement de l'huile raffinée.

La teneur en acides gras libres, qui s'exprime par l'indice d'acide (ou l'acidité), est donc une bonne indication du niveau d'altération de la graine.

Pour rappel, l'acidité oléique constitue un critère pour la réception de la récolte et ne peut dépasser une valeur de 2 % d'acidité oléique (réfaction au-delà avec refus si l'acidité dépasse 5 %).

Il existe deux modes d'expression de l'acidité de l'huile : l'indice d'acide et l'acidité oléique :

♣ **L'indice d'acide**

On entend par indice d'acide le nombre de milligrammes de potasse (KOH) nécessaire pour neutraliser l'acidité libre d'un gramme d'huile.

♣ **L'acidité oléique**

Il s'agit de la teneur en acides gras libres, exprimée conventionnellement en pourcentage d'acide oléique. Pratiquement, l'indice d'acide est le double de l'acidité oléique. L'acidité oléique est l'expression couramment utilisée par les professionnels.

En utilisation carburant, cette valeur a également son importance car une acidité trop élevée peut affecter les propriétés de l'huile de lubrification si des quantités significatives d'huile carburant atteignent le carter d'huile de lubrification.

✯ *Indice de peroxyde*

L'oxydation est un phénomène fondamental dans toutes les industries des corps gras. Il est donc important de pouvoir mesurer celle-ci.

L'altération chimique des corps gras insaturés par l'oxygène de l'air débute par la formation d'un peroxyde, et ensuite par la formation de produits de scission. Ces produits de scission résultent de la coupure de la chaîne grasse au niveau de la double liaison qui donne toute une série de composés à chaîne courte comme les aldéhydes et les cétones qui sont responsables de l'odeur des corps gras rances.

Cette réaction auto-catalytique (auto-oxydation) commence très lentement, puis après une période d'induction où l'oxydation est pratiquement indécelable, s'accélère de façon exponentielle. L'oxygène se fixe sur les chaînes grasses de façon différente suivant la température à laquelle a lieu l'oxydation.

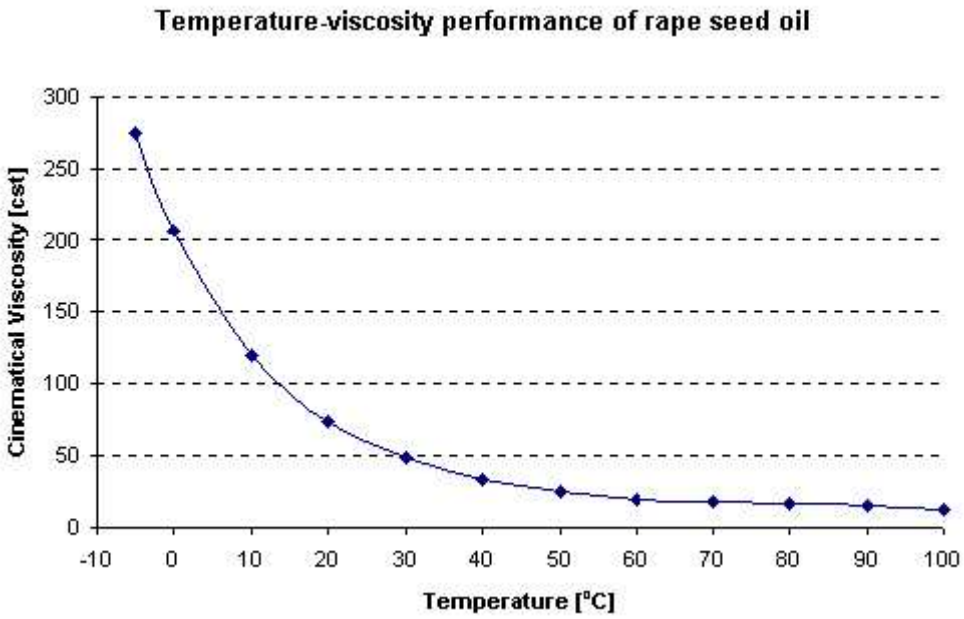
L'indice de peroxyde s'exprime en nombre de milliéquivalents d'oxygène actif par kilogramme de corps gras. Le principe de la mesure est de déterminer, par titrage redox, la teneur en iode (I_2) résultant de l'oxydation d'iodure de potassium par l'oxygène actif dégagé par les peroxydes contenus dans l'huile.

✯ *Indice d'iode*

Les liaisons éthyléniques (doubles liaisons), en particulier celles des acides gras, fixent les halogènes. Cette réaction d'addition peut être utilisée pour déterminer quantitativement l'insaturation globale des chaînes grasses.

1a	1b	2a	2b	2c	2d	2e	3a	3b	4a	4b	4c
légère altération		altération modérée					altération sévère		corrosion		

Tableau 9 : Classes de corrosion.



Graphique 5 : Évolution de la viscosité en fonction de la température.

Bien que l'iode se fixe trop lentement et trop difficilement pour être utilisé dans la pratique de la détermination, l'habitude est prise d'exprimer l'insaturation par la quantité d'iode que peut fixer le corps gras étudié. L'indice d'iode est donc le nombre de grammes d'iode fixé par 100 grammes de corps gras.

Cette méthode donne une indication de la teneur en acides gras insaturés contenus dans l'huile, elle peut donc remplacer avantageusement (moins chère et plus rapide) la détermination du profil en acide gras lorsque celle-ci n'est pas indispensable.

✯ *Corrosion sur cuivre*

Cette mesure peut être utilisée pour apprécier le pouvoir corrosif d'un produit qui peut provoquer une corrosion plus ou moins superficielle sur divers composants d'un circuit de carburant automobile : joints, tuyaux…

Le degré de corrosion s'établit par comparaison avec des plaques de cuivre de référence. Quatre classes (et sous-classes) sont définies suivant le modèle ci-contre.

L'huile de colza se retrouve dans la classe 1b, c'est-à-dire correspond à une légère altération.

✯ *Stabilité à l'oxydation à 110°C*

Cette mesure permet de caractériser le comportement de l'huile soumise à des contraintes particulières. Elle permet également de décrire le degré de vieillissement de l'huile, une augmentation de l'âge de l'huile s'accompagnant d'une augmentation de la viscosité.

Ce paramètre peut également avoir une influence sur la qualité de l'huile de lubrification du moteur.

2.2.1.2 Caractéristiques physiques

✯ *Viscosité*

La viscosité peut être définie comme une résistance à l'écoulement, à la déformation. Chez les acides gras et les triglycérides, elle est liée à leur structure, et en particulier à la longueur des chaînes et à leur insaturation :

- l'augmentation du poids moléculaire entraîne une augmentation de la viscosité ;
- l'augmentation de l'insaturation entraîne, à longueur de chaîne constante, une diminution de la viscosité, qui est pratiquement une fonction linéaire de l'accroissement de l'indice d'iode.

Les triglycérides sont plus visqueux que les acides gras qui les composent, les huiles raffinées seraient donc plus visqueuses que les huiles brutes correspondantes si ces dernières ne contenaient pas des constituants mineurs qui peuvent avoir une grande influence sur la viscosité (comme les phosphatides par exemple).

La viscosité est également fortement dépendante de la température (*Graphique 5*).

Produit	huile de colza	gazole	EMHV
Densité	0,915	0,835	0,860

Tableau 10 : Densité de quelques carburants.

Point éclair	< 0°C	0°-21°C	21°-55°C
Classe	extrêmement inflammable	facilement inflammable	inflammable

Tableau 11 : Classes des produits inflammables en fonction de leur point éclair.

Produit	huile de colza	gazole	essence
Point éclair	316°C	70°C	-40°C

Tableau 12 : Point éclair de quelques carburants.

Produit	huile de colza	gazole	EMHV
PCI (kJ/kg)	38 196	42 335	37 699
PCI (kJ/L)	35 140	35 350	33 175

Tableau 13 : Pouvoir calorifique de quelques carburants.

La viscosité peut s'exprimer de deux façons différentes :

- viscosité **dynamique** qui s'exprime en centipoise ;
- viscosité **cinématique** qui est la viscosité dynamique divisée par la masse volumique, elle s'exprime en centistockes.

La viscosité des huiles végétales est fonction de la nature des graines, et est en général plus élevée que la celle du fioul. Cette viscosité élevée peut poser problème lors de l'alimentation des moteurs, une des solutions est donc de chauffer l'huile pour en abaisser la viscosité.

✯ *Densité*

La densité peut être définie comme étant la masse de produit contenue dans un volume déterminé (un litre) dans des conditions déterminées. Ainsi, pour les carburants, la température de mesure est fixée à 15°C.

La densité varie peu entre les différentes huiles végétales, mais est supérieure à la celle du gazole d'environ 10 % (*Tableau 10*).

✯ *Point éclair*

Le point éclair d'un liquide se définit comme la température la plus basse à laquelle la concentration de vapeurs émises est suffisante pour produire une déflagration au contact d'une flamme, d'une étincelle ou d'un point chaud, mais insuffisante pour produire la propagation de la combustion en l'absence de la « flamme pilote ». Les produits peuvent être classés en fonction de leur point éclair (*Tableau 11*).

Cette caractéristique est importante dans le cas d'une utilisation énergétique de l'huile (combustion plus difficile, notamment au démarrage) mais une valeur élevée de ce point éclair est synonyme de sécurité lors de l'entreposage et de la manutention du produit.

La détermination de cette valeur a été normalisée (ISO 2719). Le tableau ci-contre donne des exemples de valeurs de point éclair pour quelques carburants (*Tableau 12*).

✯ *Pouvoir calorifique*

Le pouvoir calorifique inférieur (PCI) se définit comme la quantité de chaleur dégagée par la combustion complète d'une unité de combustible, la vapeur d'eau étant supposée non condensée et la chaleur de cette condensation non récupérée. Il s'exprime en joules par kilogramme (J/kg), même si on rencontre encore couramment des résultats exprimés en calories/kilogramme (cal/kg).

Le pouvoir calorifique supérieur (PCS) se définit comme la quantité d'énergie dégagée par la combustion complète d'une unité de combustible, la vapeur d'eau étant supposée condensée et la chaleur récupérée. Il s'exprime également en J/kg.

Cette valeur permet de comparer différents produits de nature différente, et permet de ramener, par exemple, l'ensemble des carburants sous forme de tonne-équivalent-pétrole (TEP). Les pouvoirs calorifiques des différentes huiles végétales sont proches les uns des autres, mais inférieurs de 10 % au PCI[21] du gazole. Cependant, en raison d'une différence de densité, le PCI des huiles végétales exprimé par unité de volume se rapproche de celui du gazole, comme le montre le tableau ci-contre (*Tableau 13*).

[21] PCI : Pouvoir Calorifique Inférieur.

Produit	100 % HVP	75 % HVP 25 % gazole	50 % HVP 50 % gazole	25 % HVP 75 % gazole	gazole	EMHV
Indice de cétane	ND	ND	47,4	49,1	>49	49-51

Tableau 14 : Indice de cétane de quelques carburants et mélanges.

Point de congélation	-29°C
Température limite de filtrabilité	+14°C

Tableau 15 : Point de congélation et température limite de filtrabilité de l'huile de colza.

✯ *Indice de cétane*

L'indice de cétane traduit l'aptitude d'un carburant pour moteur Diesel à s'enflammer dans des conditions d'essai normalisées. Cette caractéristique est particulièrement importante pour le gazole (ou les biocarburants équivalents), où le carburant doit s'auto-enflammer sous l'effet de la compression de l'air enfermé dans le cylindre.

Le zéro de l'échelle de cet indice est donné par la valeur du méthylnaphtalène qui a une forte résistance à l'inflammation, et la valeur 100 est donnée par le cétane qui s'enflamme facilement.

- Un **indice trop bas** provoque :
  - des difficultés de démarrage à froid ;
  - une augmentation du niveau de bruit.
- Un **indice trop élevé** (>60) :
  - réduit le bruit des moteurs mais
  - présente un mauvais rendement thermodynamique.

Aucune méthode d'essai satisfaisante n'existe actuellement pour pouvoir déterminer correctement l'indice de cétane des produits fort visqueux comme l'huile végétale, car la méthode standardisée a été mise au point pour le gazole. Si ce paramètre est déterminé avec les méthodes classiques, les résultats seront inférieurs aux valeurs disponibles pour le gazole, mais la pratique montre que le retard à l'allumage se raccourcit par rapport au gazole. *(ELSBETT)*.

Les résultats obtenus avec les méthodes classiques de détermination sont présentés au tableau ci-contre (*Tableau 14*). Ces résultats reprennent également des analyses faites sur différents mélanges HVP – gazole, ainsi que les données relatives au gazole et à l'EMHV.

Au vu de ces résultats, le mélange 25 % HVP + 75 % gazole permet de répondre aux prescriptions adoptées pour le gazole (>49).

✯ *Point de congélation et température limite de filtrabilité*

Ces différents paramètres ne doivent répondre pour l'instant à aucune spécification pour un usage carburant, mais peuvent cependant se révéler importants lors d'une utilisation par des véhicules soumis aux conditions hivernales parfois rudes dans certaines régions. Ainsi, une température limite de filtrabilité élevée (*Tableau 15*) pourra poser des problèmes d'alimentation de la pompe d'injection lorsque les températures approcheront ou passeront sous cette température. Si tel est le cas, des solutions devront être apportées pour contourner le problème (filtre réchauffeur…).

✯ *Contamination*

Ce paramètre est un des plus importants pour une utilisation carburant de l'huile. Cette mesure permet en effet de déterminer la pureté de l'huile ainsi que l'efficacité du processus de filtration de l'unité de production. Une contamination trop importante conduira à un colmatage prématuré des filtres des véhicules, à un encrassement du circuit de carburant et peut avoir un effet abrasif sur certains organes sensibles (pompes, injecteurs).

Des résultats d'analyses faites sur de l'huile ayant subi une filtration à 10 µm conduisent à des valeurs très élevées (479 ppm), ce qui doit conduire à une réflexion sur la filtration mise en place : matériel inadapté ou nécessité de descendre à des niveaux de filtration plus bas (5 µm).

LANDTECHNIK WEIHENSTEPHAN	LTV-Work-Session on Decentral Vegetable Oil Production, Weihenstephan **Quality Standard for Rapeseed Oil as a Fuel (RK-Qualitätsstandard)** 05/2000	in Cooperation with:

Properties / Contents	Unit	Limiting Value min.	Limiting Value max.	Testing Method
charcteristic properties for Rapeseed Oil				
Density (15 °C)	kg/m³	900	930	DIN EN ISO 3675 DIN EN ISO 12185
Flash Point by P.-M.	°C	220		DIN EN 22719
Calorific Value	kJ/kg	35000		DIN 51900-3
Kinematic Viscosity (40 °C)	mm²/s		38	DIN EN ISO 3104
Low Temperature Behaviour				Rotational Viscometer (testing conditions will be developed)
Cetane Number				Testing method will be reviewed
Carbon Residue	Mass-%		0.40	DIN EN ISO 10370
Iodine Number	g/100 g	100	120	DIN 53241-1
Sulphur Content	mg/kg		20	ASTM D5453-93
variable properties				
Contamination	mg/kg		25	DIN EN 12662
Acid Value	mg KOH/g		2.0	DIN EN ISO 660
Oxidation Stability (110 °C)	h	5.0		ISO 6886
Phosphorus Content	mg/kg		15	ASTM D3231-99
Ash Content	Mass-%		0.01	DIN EN ISO 6245
Water Content	Mass-%		0.075	pr EN ISO 12937

00 1ER 100e

Tableau 16 : Prénorme allemande de l'HVP. ***(GUIRAL E., SAINT-CYR C., 2005)***

✯ *Couleur*

La couleur de l'huile n'a, en tant que telle, pas beaucoup d'importance pour avoir une utilisation non alimentaire. Pour un usage alimentaire cependant, ce facteur peut avoir son importance, notamment au niveau de la commercialisation, même s'il n'influence pas le goût ni la composition de l'huile.

L'huile de colza ou de tournesol, n'ayant subi aucun traitement chimique tel que raffinage, décoloration…, est d'un jaune prononcé.

2.2.2 Normalisation de l'huile

Dans un objectif de développement de la filière huile végétale pure à une échelle plus importante, y compris avec la participation des constructeurs, il devient indispensable de mettre au point une norme de production d'huile pour une utilisation carburant comme pour le gazole et le fioul (cf. *annexe 2*). Certains pays comme l'Allemagne ou l'Autriche sont très avancés à ce sujet.

À l'heure actuelle, il n'existe qu'une prénorme (*Tableau 16*) établie par l'Université Technique de Munich. Un comité spécifique est chargé de mettre au point cette norme, toujours dans un objectif de faire adhérer les constructeurs au développement de leurs moteurs pour les HVP.

- **Density :** densité à 15°C ;
- **Flash Point by P.-M.:** point éclair ;
- **Calorific Value :** pouvoir calorifique ;
- **Cinematic Viscosity :** viscosité cinématique à 40°C ;
- **Low temperature behaviour :** comportement à faible température ;
- **Cetane Number :** indice de cétane ;
- **Carbon Residue :** résidus de carbone ;
- **Iodine Number :** indice d'iode ;
- **Sulphur Content :** teneur en souffre ;
- **Contamination :** contamination ;
- **Acid Value :** indice d'acide;
- **Oxidation Stability :** stabilité à l'oxydation ;
- **Phosphorus Content :** teneur en phosphore ;
- **Ash Content :** teneur en cendres ;
- **Water Content :** teneur en eau.

Les expériences pratiques ont montré que les propriétés caractéristiques ne peuvent de toute façon pas être influencées, contrairement aux propriétés variables. Ainsi, un contrôle approximatif de la qualité de l'huile doit principalement se focaliser sur :

- contamination (impuretés) ;
- teneur en phosphore ;
- teneur en eau.

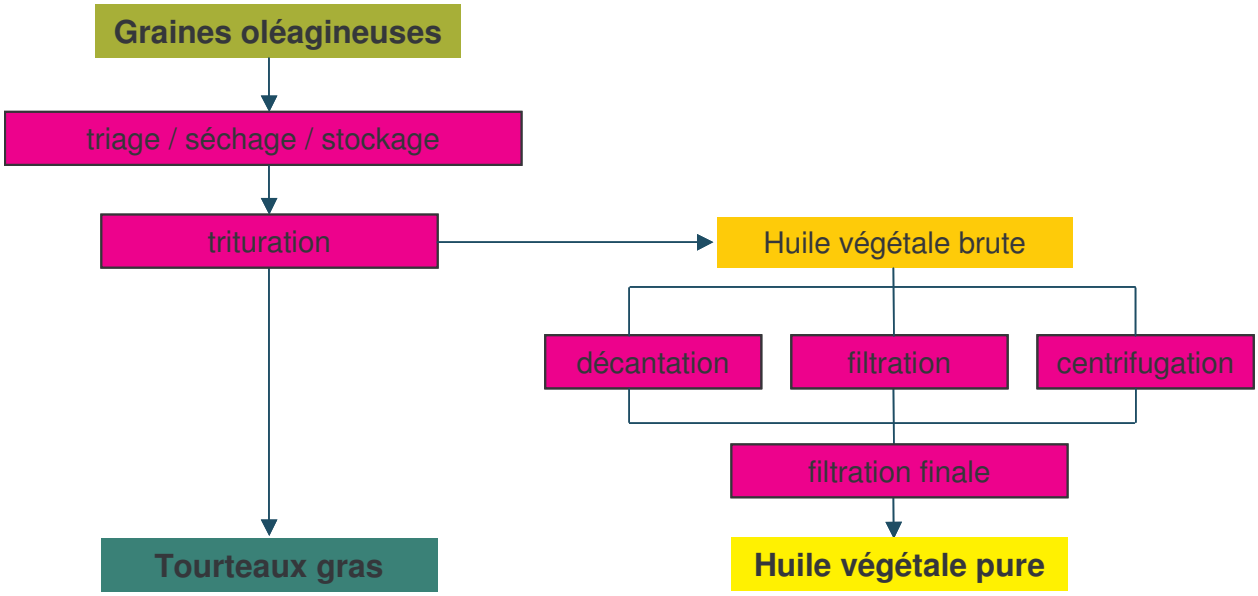


Figure 6 : Présentation schématique de la trituration à froid.

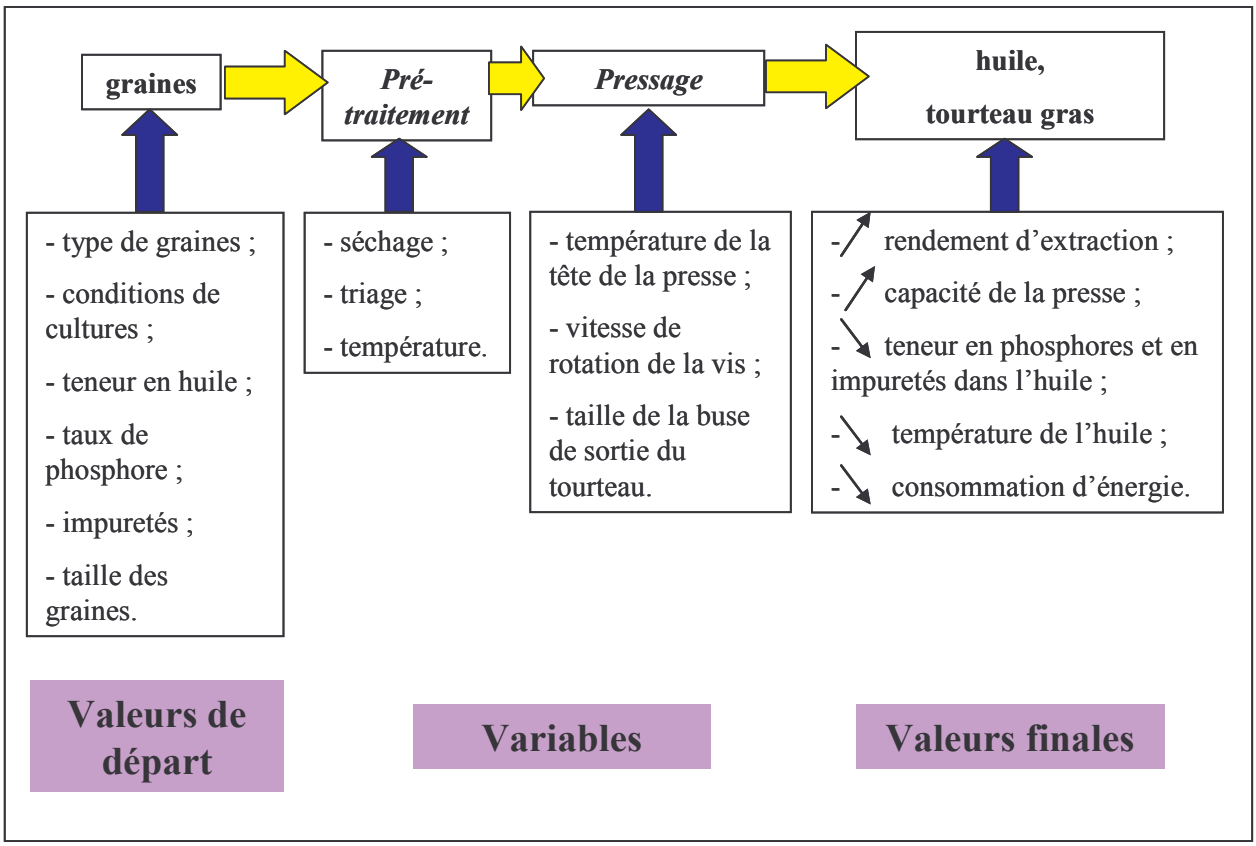

graines
Pré-traitement
Pressage
huile, tourteau gras
- type de graines ;
- conditions de cultures ;
- teneur en huile ;
- taux de phosphore ;
- impuretés ;
- taille des graines.
- séchage ;
- triage ;
- température.
- température de la tête de la presse ;
- vitesse de rotation de la vis ;
- taille de la buse de sortie du tourteau.
- ↗ rendement d'extraction ;
- ↗ capacité de la presse ;
- ↘ teneur en phosphores et en impuretés dans l'huile ;
- ↘ température de l'huile ;
- ↘ consommation d'énergie.
Valeurs de départ
Variables
Valeurs finales

Figure 7 : Paramètres influençant la production d'huile et de tourteau. ***(FERCHAU E., 2000)***

2.2.3 Trituration et traitements de l'huile

L'huile végétale pure est obtenue par première pression à froid (*Figure 6*). La pesée de la récolte est obligatoire dans le cas de colza ou tournesol cultivés sur jachère ou hors jachère comme cultures énergétiques (contrats ONIOL). De plus, la quantification des graines récoltées permet à l'agriculteur d'estimer les quantités de produits de trituration obtenus.

Récoltés en juin, juillet ou en septembre, le colza et le tournesol pourront être triturés tout au long de l'année. Le stockage doit alors préserver la valeur essentielle des graines : l'huile. C'est ainsi qu'une humidité comprise entre 7 et 9 % et une température de l'ordre de 10°C permettront une plus longue conservation des grains, en évitant tout risque de fermentation.

Enfin, dans le but de préserver la presse des éventuels dégâts occasionnés par des corps étrangers mais aussi de garantir un degré élevé de pureté des produits et coproduits de la trituration, il est conseillé de trier et nettoyer les grains afin d'obtenir un taux d'impuretés inférieur ou égal à la norme de commercialisation qui est de 2 %.

2.2.3.1 Pressage

Sans aucune cuisson ni aplatissage, la trituration des graines d'oléagineux se réalise par des presses à vis dont la capacité varie entre 5 et 2 000 kg de graines/heure. Plusieurs paramètres sont à prendre à compte lors de cette étape, qui vont influencer plus ou moins fortement la quantité et la qualité du produit final (*Figure 7*).

Avec une teneur en huile de 44 %[22] en moyenne, la trituration des graines permet d'obtenir en moyenne 32 à 36 % d'huile, les 8 à 12 % restants se retrouvent avec le tourteau (*Figure 8*). Les 8 à 12 % d'huile non extraite forment un tourteau contenant 12,8 à 17,7 % de matières grasses :

8 x 100 / 62,6 = 12,8 % MG[23].

✯ *Les paramètres de pressage*

Le résultat du pressage dépend de différents paramètres, liés tout d'abord aux graines triturées et ensuite à la presse elle-même.

Les graines influencent la trituration selon différents paramètres :

- l'**espèce** : le colza, plus facile à triturer que le tournesol, use moins la presse ;
- le **taux d'impuretés** ;
- le **taux d'humidité**.

Les paramètres liés à la presse sont :

- la **vitesse de rotation du moteur** : elle est variable sur certains modèles ;
- le **diamètre de la buse** de sortie du tourteau ;
- la **température de la tête** de la presse : certaines sont équipées d'un système de chauffage qui va faciliter la trituration (au moins au départ).

[22] 44 % de la matière sèche de la graine.
[23] MG : matières grasses.

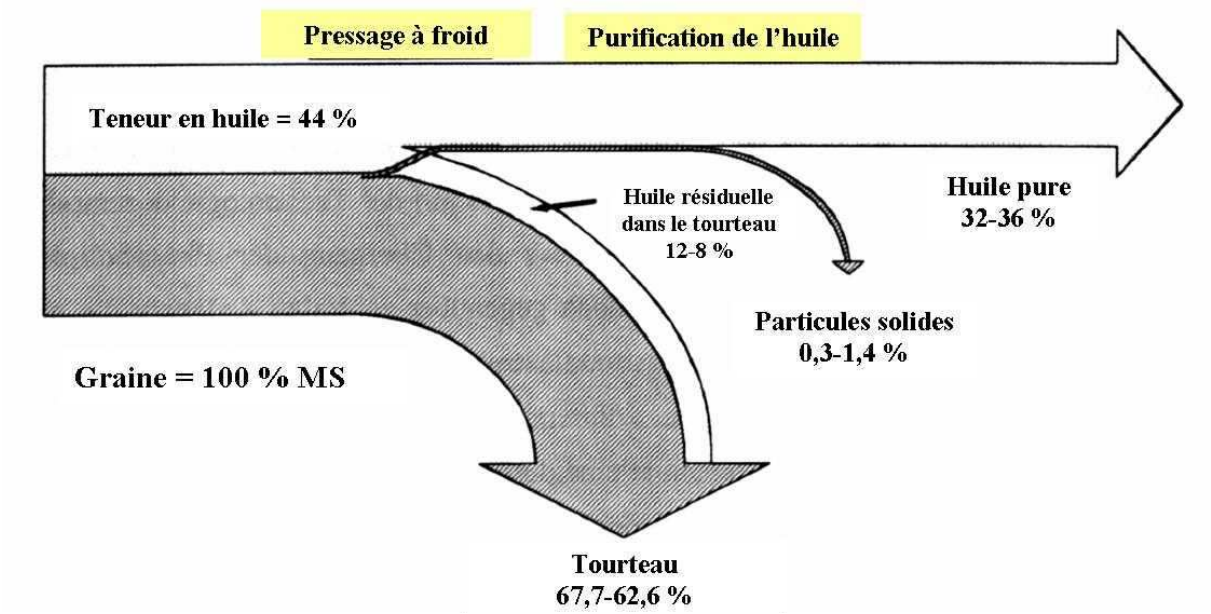


Figure 8 : Distribution des quantités de produits lors de la trituration à froid. ***(FERCHAU E., 2000)***

Valeurs mesurées	***Variables***		
	vitesse de rotation ↑	*humidité de la graine* ↑	*température de la graine* ↑
teneur en phosphore	↑	↑	↑
débit	↑	↑	↓
teneur en particules	↑	↓	↓
rendement en huile	↓	↓	↑
énergie consommée	↑	↓	↑

↑ *augmente* ↓ *diminue*

Tableau 17 : Variation des caractéristiques de l'huile en fonction des conditions de pressage. ***(FERCHAU E., 2000)***

La relation entre ces différentes variables et les valeurs à atteindre en pression à froid est explicitée dans le tableau ci-contre (*Tableau 17*). Ces résultats ont été constatés dans le cas d'une petite presse à trous d'une capacité de 15 kg de graines/heure.

Afin de mesurer les quantités d'huile obtenues, on définit un rendement d'extraction :

$$\text{Rendement d'extraction (\%)} = \frac{\text{quantité d'huile extraite de la graine}}{\text{quantité d'huile contenue dans la graine}}$$

Le schéma ci-contre (*Figure 8*) donne un rendement de pressage compris entre 73 et 82 %.

♦ *Vitesse de rotation de la presse*

En augmentant sa vitesse de rotation, on va pouvoir améliorer la capacité de trituration de la presse, mais le rendement d'extraction sera moins bon. Le graphique suivant[24] (*Graphique 6*) montre clairement une augmentation du débit de la presse avec la vitesse de rotation, mais la croissance du rendement en huile est plus faible, il a donc tendance à diminuer avec la vitesse.

De plus, l'huile obtenue sera de moins bonne qualité, car plus riche en particules et phosphore, et la consommation d'énergie sera plus importante. Enfin, une vitesse de rotation plus élevée va augmenter le travail mécanique de la presse, risquant de créer une élévation de température avec toutes les conséquences que cela entraîne.

À vitesse de rotation égale, le diamètre de la buse de sortie du tourteau va lui aussi modifier le rendement d'extraction : une buse plus petite va permettre une pression plus forte et donc un rendement plus élevé. On constate cependant sur le graphique que ces rendements tendent à se rejoindre (toujours en diminuant) lorsque la vitesse de rotation augmente fortement (*Graphique 7*).

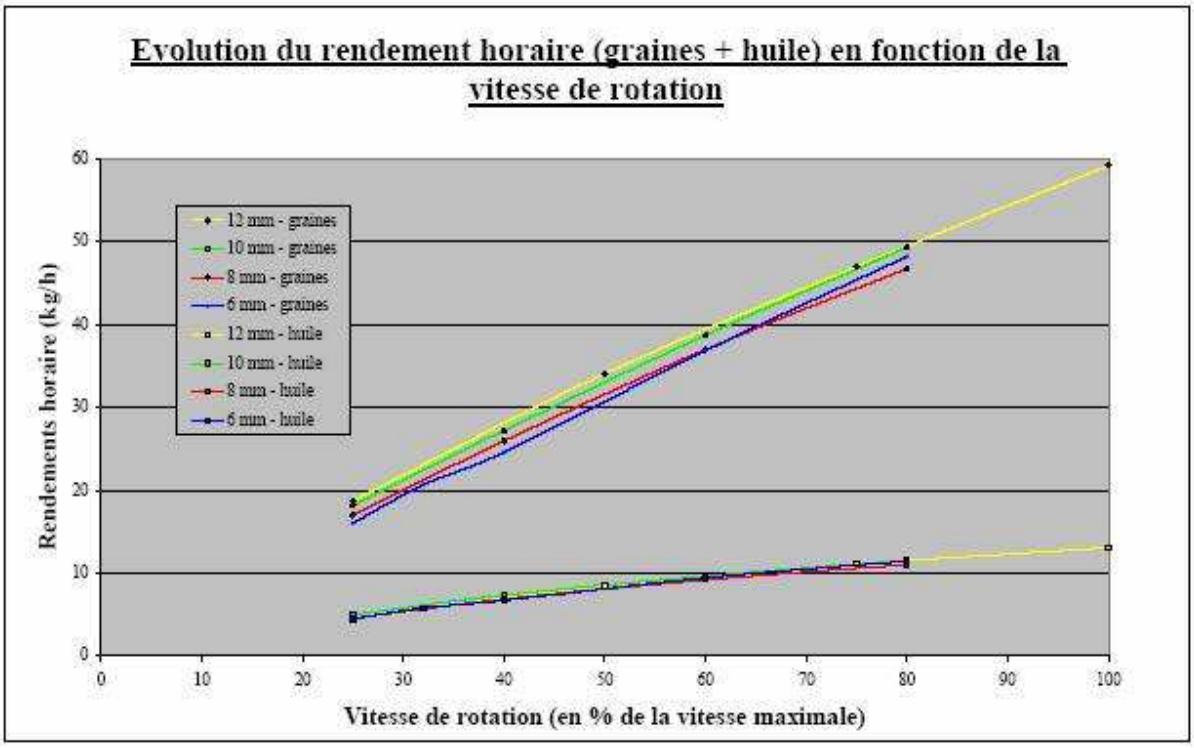
♦ *Taux d'humidité de la graine*

En réduisant l'humidité des graines, le rendement d'extraction augmente tandis que la teneur en phosphore diminue. Cependant, la capacité de la presse va diminuer et la teneur en particules solides présentes dans l'huile va augmenter.

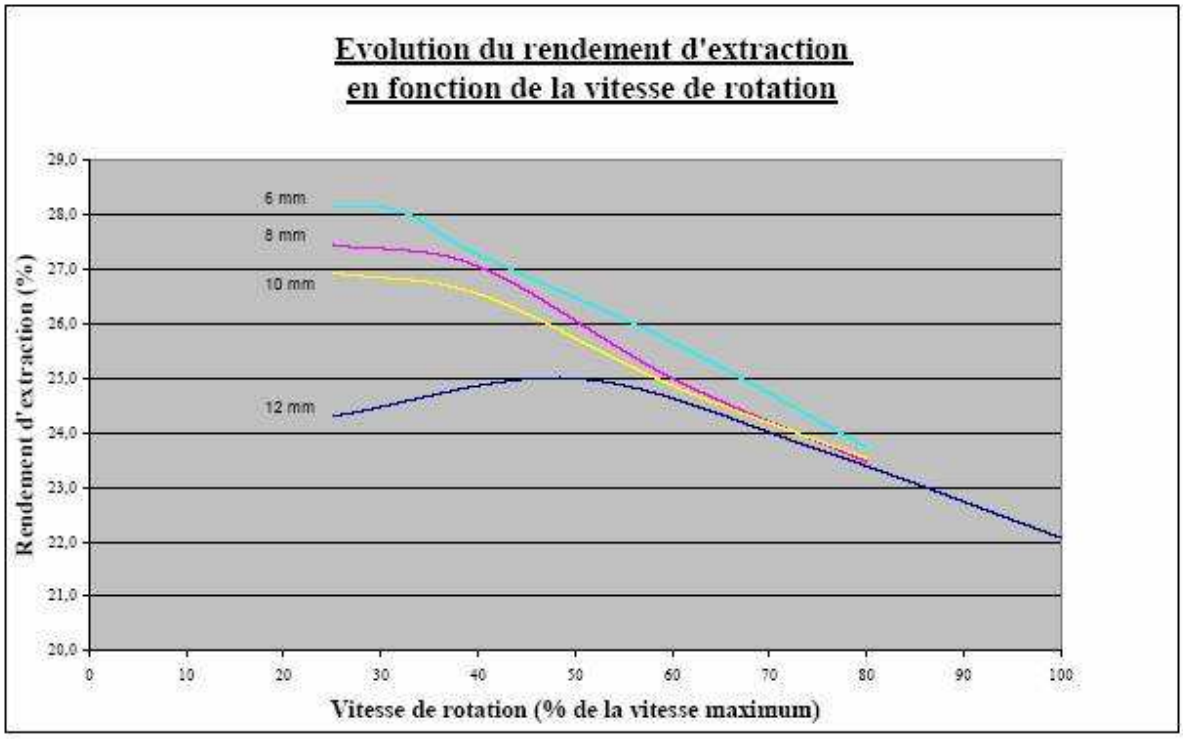
De même, la consommation d'énergie sera plus importante lors du pressage de graines très sèches. La présence d'eau permet en effet de diminuer les frottements des graines pendant leur pressage et donc d'améliorer le débit de la machine, même si le rendement en huile se retrouve moins élevé.

Une humidité moyenne est donc préférable : entre **6,5 et 7,5 %** d'eau dans les graines. Dans cette fourchette, on se situe à l'optimum de la capacité de la presse, du rendement d'extraction et des teneurs en phosphore et particules solides de l'huile brute.

[24] Essais réalisés sur une presse Täby 55 (type presse à trous).



Graphique 6 : Évolution des rendements horaires en fonction de la vitesse de rotation. ***(JOYE P., 2003)***



Graphique 7 : Évolution du rendement d'extration en fonction de la vitesse de rotation et du diamètre de la buse de sortie. ***(JOYE P., 2003)***

♦ *Température des graines*

Un pressage « à chaud » de type industriel, c'est-à-dire en préchauffant les graines à 90-100°C avant leur pressage, permettra d'obtenir un rendement d'extraction relativement fort (80-90 %), avec en plus un tourteau à faible taux de matières grasses (8-12 %).

Inversement, une pression des graines à froid va diminuer ce rendement d'extraction (70-75 % seulement), et fournir un tourteau plus gras (14-25 %), qui est toujours utilisable en alimentation animale mais sous certaines conditions (taux de matières grasses maximum dans la ration). À noter que l'on parle ici de pression à froid, mais il faut savoir que l'huile et le tourteau sortent plus ou moins chauds à l'issue de la trituration, du fait du travail mécanique de la presse. La température varie de 60° à 80°C selon le type de presse employé, la vitesse de rotation, etc.…

Concernant les phospholipides, une trituration à froid offre l'avantage de produire une huile dont la teneur en phosphore, qui est un constituant de la graine, reste peu élevée (<100 ppm), celui-ci restant dans le tourteau.

En revanche, une extraction industrielle, c'est-à-dire une pression à chaud plus une extraction à l'hexane, donne une huile avec des teneurs en phospholipides qui peuvent atteindre 500 ppm. Ces huiles fortement chargées nécessitent donc un dégommage (qui fait partie du processus de raffinage) pour une utilisation future comme carburant (comme dans le cas de l'EMHV).

☆ *Le prétraitement des graines*

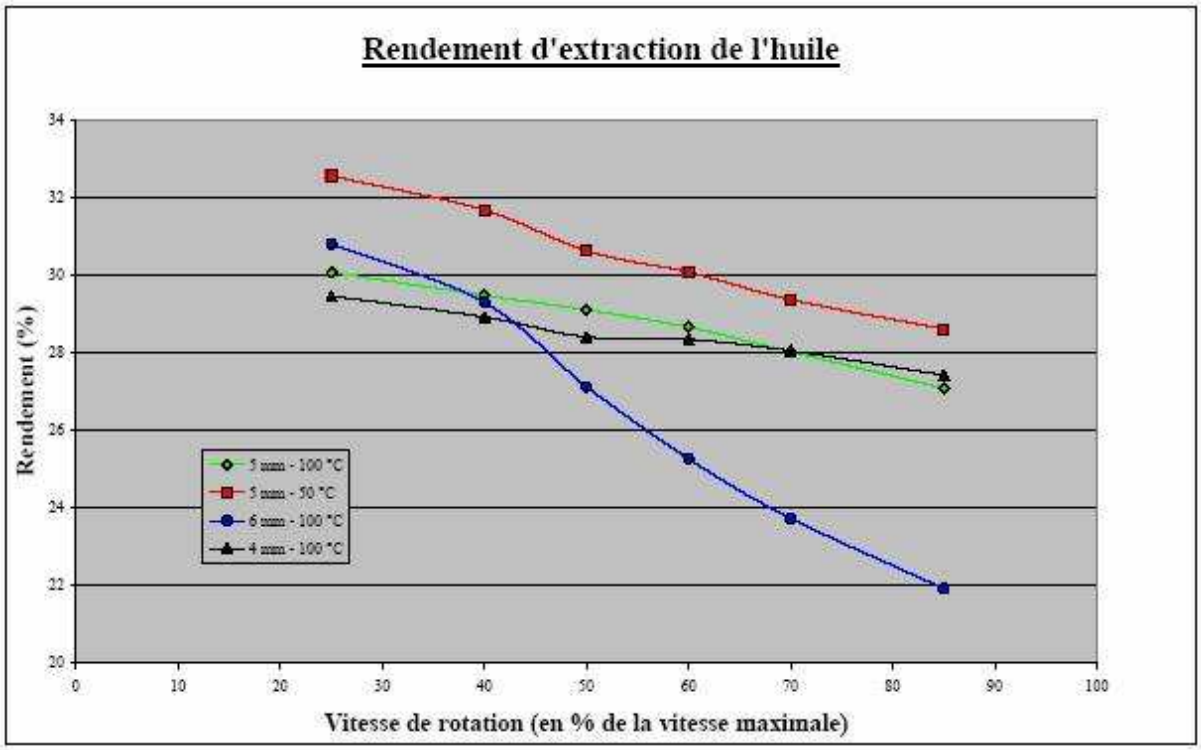
♣ Préchauffage

Un **préchauffage** des graines peut être réalisé, mais ne doit pas excéder 20°C. Si les graines atteignent une température supérieure, il n'y a pas d'effets positifs mais plutôt des effets négatifs à partir de 60°C : diminution du taux d'extraction et augmentation du taux de phosphore (*Graphique 8*).

Au vu de ces résultats, il apparaît clairement que, quelle que soit la buse utilisée (pour la sortie du tourteau) ou la température des graines, plus la vitesse de rotation est élevée, moins le rendement d'extraction est élevé. Il apparaît également que pour une température basse (50°C) et pour une même buse de sortie du tourteau (5 mm), le rendement d'extraction est plus élevé, au détriment cependant du rendement horaire qui est 25 à 35 % plus faible qu'avec une température de 100°C.

Quelques fabricants de presses offrent un système de récupération de la chaleur du tourteau, permettant un réchauffage des graines avant leur entrée dans la presse (Strähle par exemple). Attention toutefois, cette unité de préchauffage doit éviter tout contact entre l'air chaud et humide issu du tourteau et la graine froide, sinon l'humidité de la graine augmentera par condensation.

Si la graine est trop froide (<10°C), le rendement sera faible. Une forte quantité de graines non pressées se retrouvera dans le tourteau, ainsi qu'une forte concentration de particules solides dans l'huile.



Graphique 8 : évolution du rendement d'extraction en fonction de la vitesse de rotation et de la température des graines. ***(JOYE P., 2003)***

♣ Broyage, aplatissage, décorticage

Le **broyage** des graines avant pressage donne de mauvais résultats, et tout particulièrement une augmentation des teneurs en phosphore et particules dans l'huile. Ce traitement reste donc inutile dans le cas d'espèces oléagineuses provenant de nos climats tempérés.

En revanche, pour les presses de grosses capacités (>1000 kg de graines/h), il est recommandé d'**aplatir** les graines (le colza notamment) pour améliorer le rendement en huile. Mais ce système n'est pas utile dans le cas d'unités plus petites.

Dans le cas du tournesol, un **décorticage** des graines peut être intéressant avant le pressage. Cela permet de réduire l'usure du matériel et la teneur en cires de l'huile.

✯ *Seconde pression*

Afin toujours d'augmenter le rendement d'extraction et donc d'obtenir des tourteaux moins gras, il a été essayé de repasser dans la presse les tourteaux obtenus lors du premier pressage. Les résultats obtenus sont encourageants au niveau de la quantité d'huile, mais de nouveaux inconvénients sont apparus : une surveillance constante est devenue nécessaire car la structure du tourteau occasionne de fréquents bourrages à l'entrée de la presse (orifice trop petit). De plus, l'huile extraite lors de ce deuxième pressage risque d'être fortement chargée en phosphore et autres impuretés, ce qui risque de la rendre inutilisable en carburant.

Aucun résultat n'est malheureusement donné concernant le taux de matières grasses du tourteau obtenu en seconde pression, nous allons essayer de l'estimer : supposons que la première pression ait été réalisée dans les conditions optimales, c'est-à-dire sans chauffage important (<50°C), avec une buse de sortie de 8 mm et à une vitesse de rotation de 40 % de la vitesse maximale, nous aurions obtenu un tourteau à 24 % de matières grasses :

- masse de graines avant pressage = 2998 g ;
- pourcentage d'huile dans les graines = 44 % ;
- masse d'huile extraite = 796 g ;
- masse du tourteau obtenu = 2192 g ;

⇒ quantité d'huile résiduelle dans le tourteau = 2998 x 0,44 – 796 = 521 g ;
taux MG du tourteau [1] = 521 / 2192 = **24 %**.

La seconde pression a donné un résultat de 14,4 % d'huile extraite par rapport à la masse de produit de départ. Dans notre cas précédent, cela représenterait une production d'huile supplémentaire de : 2192 x 14,4 % = 317 g. Sachant que ce tourteau contenait encore 521 g. d'huile avant d'être re-pressé, il n'en contiendra plus que : 521 – 317 = 204 g. La quantité de tourteau obtenu en sortie du deuxième pressage sera de : 2192 – 317 = 1875 g. Nous pouvons donc calculer le taux de matières grasses de ce tourteau re-pressé :

⇒ taux MG du tourteau [2] = 204 / 1875 = **11 %**.

Ce deuxième pressage permet d'obtenir un tourteau très intéressant pour l'alimentation, avec moins de problèmes d'assimilation chez les animaux. Cependant, une étude de rentabilité économique devra être menée pour juger de l'opportunité d'une telle opération.

De même, un taux de 24 % de matières grasses à l'issue d'une première pression à froid est déjà au départ très élevé. Mais ce type de presse est connu pour ce problème-là, et d'autres modèles permettent d'obtenir de bien meilleurs résultats.

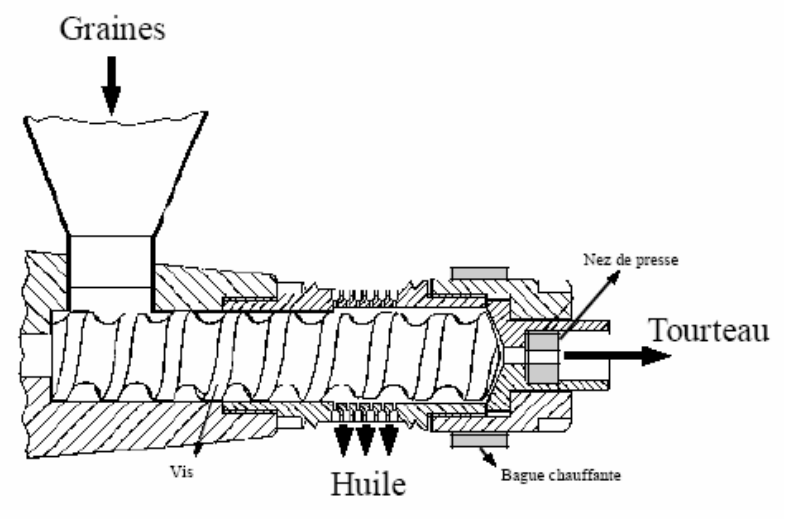


Figure 9 : Presse à cylindre perforé. ***(JOYE P., 2003)***

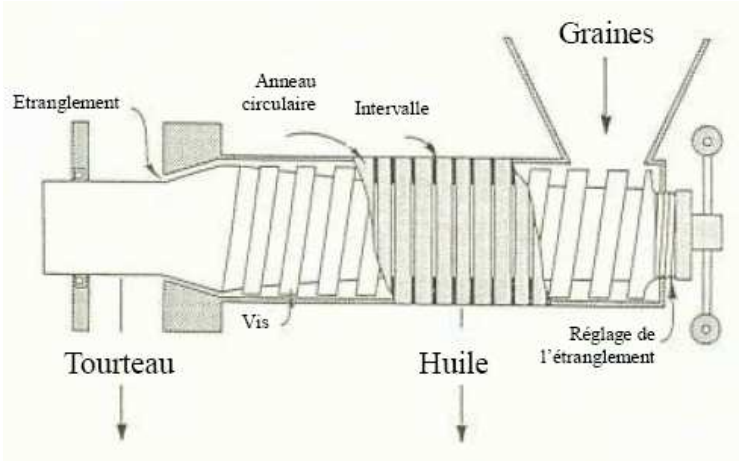


Figure 10 : Presse à cage d'écureuil. ***(JOYE P., 2003)***

En résumé, le pressage à froid de graines d'oléagineux nécessite de trouver un compromis entre trois objectifs principaux :

- **maximiser la capacité de la presse** (débit) ;
- **maximiser le rendement en huile** ;
- **minimiser les éléments indésirables** (particules, phosphore…) dans l'huile.

D'après toutes ces informations, on peut en conclure qu'en pression à froid pour une utilisation d'huile en carburant, la recherche d'une huile de qualité doit prévaloir devant la recherche d'un rendement maximum.

✯ *Le matériel de pressage*

Il existe deux types de presses permettant la production d'huile végétale de première pression à froid :

♣ Les presses « à trous »

La vis entraîne les graines vers le nez de la presse, où une compression croissante s'opère depuis l'entrée de la graine. L'huile extraite sous la pression remonte en amont vers les orifices, les « trous », où elle peut s'écouler, et le tourteau est évacué par le nez interchangeable (tête) de la presse (*Figure 9*). Lors du démarrage de la presse, pour favoriser et permettre la bonne séparation de l'huile et du tourteau, la tête doit être chauffée par l'intermédiaire d'une bague chauffante (simple résistance) qui entoure le nez de la presse. Après quelques instants de trituration, ce chauffage n'est plus nécessaire car la température est maintenue par le mécanisme d'extraction (environ 80°C).

Le diamètre et la longueur de l'embout de sortie (nez de la presse) peuvent être changés suivant le type de graines pressées, les impuretés présentes (cailloux, débris…). Ce type de presse est limité à des débits de trituration de l'ordre de 5 à 140 kg/h. Les réglages de la presse ne portent que sur la vitesse de rotation de la vis et l'embout de sortie (diamètre).

Les fabricants de presses « à trous » les plus connus sont Täby, Kern Kraft, Oekotec… (*4.1 Les presses*).

♣ Les presses « à barreaux »

Le cylindre de la presse est composé d'anneaux de métal disposés parallèlement formant une cage de barreaux espacés. La pression est obtenue par une augmentation du diamètre de la vis à l'intérieur du cylindre. L'huile s'écoule entre les barreaux tout de suite après le pressage et le tourteau sort sous forme de chips ou de bouchons après étranglement entre la vis et le cylindre.

Pour la trituration de graines différentes, les modifications portent sur la taille de l'étranglement, la vitesse de rotation et l'écartement entre les barreaux. Ce type de presse existe pour des plages de débit de 15 à 2 000 kg/h.

Les presses « à barreaux » ont l'avantage de ne pas séparer la zone d'extraction de l'huile de son exutoire et de donner de meilleurs rendements d'extraction de l'huile ; elles sont par contre un peu plus chères. Le travail de pressage apporte un inévitable échauffement du matériel et donc des graines pressées, de l'ordre de 60°C. Mais cela reste inférieur à l'échauffement constaté sur le type de presse précédent (presses à trous), ce qui permet d'obtenir une extraction d'huile relativement élevée avec un taux de phosphore réduit.

Les marques de presses « à barreaux » les plus répandues sont Karl Strähle, la Mécanique Moderne, Reinartz, Liatech… (*4.1 Les presses*).

Toutes ces presses comportent une pièce d'usure non négligeable, qui est la vis sans fin. Les constructeurs ont tendance à sous-estimer cet aspect-là, puisque certains préconisent un remplacement de la vis à partir de 10 000 heures de fonctionnement. Or, les utilisateurs ont plutôt constaté une usure « prématurée » dès 3 000 heures de pressage de colza et seulement 1 600 heures avec du tournesol (sur une presse à trous de marque TÄBY).

La propreté des graines, la vitesse de rotation de la presse… sont des éléments majeurs dans l'usure de la presse.

2.2.3.2 Purification de l'huile brute

(JOYE P., 2003)

L'huile obtenue en sortie de presse est composée à 95 % de triglycérides, mais reste fortement chargée en impuretés et autres composés indésirables, qu'il sera nécessaire d'éliminer (tout au moins certains) pour une utilisation carburant, afin d'éviter tout problème de colmatage et d'encrassement dans les moteurs.

Ces composés minoritaires (gommes, cires…) sont principalement :

- des glycérides partiels (1-10 %) ;
- des acides gras libres (0,5-5 %) ;
- des insaponifiables, des pigments… (0,5-2 %) : stérols, tocophérols[25]…
- des phospholipides (0,1-1 %).

Plusieurs techniques, parfois complémentaires, existent pour obtenir une qualité d'huile qui voudrait se rapprocher d'une pseudo norme carburant.

✯ *La sédimentation*

La sédimentation est la technique la plus simple et la moins coûteuse pour effectuer une séparation solide / liquide de l'huile. Cette méthode utilise le principe de différence de densité entre les particules.

Cependant, la décantation demande un espace et un temps de séjour en cuve importants. Pour cette raison, ce type d'installation n'est recommandé que pour les unités de trituration qui ne dépassent pas 1 tonne de graines par jour.

L'inconvénient majeur de la sédimentation reste la teneur élevée en huile contenue dans les sédiments. Pour cela, la centrifugation et la filtration donnent de meilleurs rendements de purification d'huile.

[25] Tocophérols : anti-oxydants naturels, qui seront conservés par décantation et filtration.

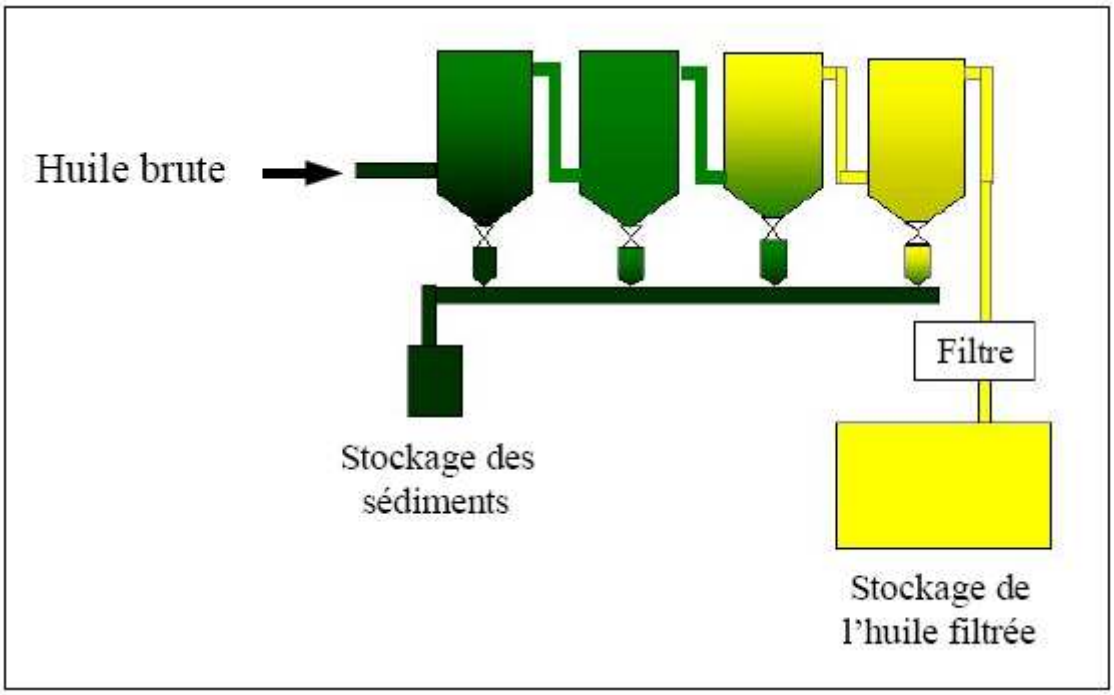


Figure 11 : Installation de décantation (avec filtre terminal). ***(JOYE P., 2003)***

Le système de sédimentation classique s'opère par étapes successives (*Figure 11*). Plusieurs cuves disposées en continu fonctionnent avec un système de débordement. Dans chaque cuve (étape de sédimentation) l'huile doit rester entre 2 et 4 jours en fonction de la température. La sédimentation est favorisée par une diminution de la viscosité, donc par des températures élevées. De même l'installation devra limiter les remous d'huile afin de ne pas remettre en suspension les sédiments. Comme nous l'avons déjà écrit, il est nécessaire d'avoir un grand espace pour réaliser cette sédimentation de manière à avoir un volume de sédimentation correspondant à plusieurs jours de production.

Pour rendre optimale la décantation, chaque cuve doit avoir un fond conique permettant par un système de vanne d'évacuer les sédiments hors du tank de sédimentation. Une alternative à ce procédé est d'interrompre la production d'huile, de vidanger et nettoyer les cuves.

Dans des conditions optimales, la décantation permet de retirer de l'huile toutes les particules solides de plus de 8 µm de diamètre. Afin de respecter une qualité d'huile carburant il est cependant nécessaire de filtrer l'huile après sédimentation.

✯ *La centrifugation*

La centrifugation utilise, comme son nom l'indique, la force centrifuge pour sédimenter les particules solides. La viscosité de l'huile peut être un frein à l'utilisation de certaines centrifugeuses, mais pour remédier à cela, certains constructeurs proposent de chauffer l'huile.

Cette technique est de loin la plus rapide et pourrait donner les meilleurs résultats en termes de qualité d'huile pour répondre à une future norme. De plus, contrairement à la sédimentation, le pourcentage en « éléments indésirables » dans l'huile est plus faible, le gaspillage est donc réduit.

En revanche, la centrifugation nécessite un investissement lourd (plusieurs milliers d'euros), elle reste réservée à des unités moyennes de trituration.

✯ *La filtration*

La filtration permet, sous l'effet de la pression hydraulique, de réaliser une séparation de phases au travers de parois poreuses. Lors de la filtration, un « gâteau de filtration » se dépose sur les parois du filtre. De par la porosité de ce dépôt solide, l'écoulement du liquide est encore possible jusqu'au colmatage du filtre et du « gâteau de filtration » par de fines particules.

La vitesse de filtration diminue lorsque l'épaisseur du « gâteau » augmente. Pour garder un débit suffisant, il faut alors augmenter le gradient de pression en augmentant la pression d'alimentation. On peut aussi modifier le « gâteau de filtration » en incorporant des adjuvants de filtration dont le rôle est de diminuer la porosité du dépôt solide.

La température de l'huile est un facteur important : à faible température, les glycérines de l'huile risquent de colmater trop rapidement les filtres. De plus, l'écoulement de l'huile au travers des membranes du filtre diminue à faible température. D'autre part, il n'est pas conseillé de chauffer l'huile au dessus de 60°C, cela risquerait d'augmenter son acidité et de diminuer sa durée de conservation.

Le choix des filtres dépend de la nature de l'installation (continue, discontinue, débit) et aussi de l'objectif recherché (filtration grossière, primaire ou de sécurité). Si le débit de la presse est suffisant pour alimenter le filtre, la filtration peut se faire en continu.

Mais bien souvent le débit de la presse est inférieur à celui de l'unité de filtration, il est alors bon d'opter pour un système discontinu. Dans ce cas, si on choisit de ne pas laisser l'huile décanter et de filtrer un produit homogène, il faut stocker l'huile dès la sortie de la presse dans une cuve tampon où elle sera homogénéisée en attendant sa filtration.

♣ Filtration primaire

♦ *Les filtres-presses*

La filtration est réalisée, souvent, au travers de filtres à toiles métalliques. La paroi de ces filtres n'est pas poreuse mais elle sert de support au « gâteau de filtration » qui joue le rôle de surface poreuse. Ces filtres sont conçus pour recevoir un gâteau de filtration. Au début de la filtration, sur une durée d'environ 30 minutes, l'huile circule dans le filtre afin d'obtenir un gâteau assez épais.

Les toiles métalliques sont disposées verticalement et peuvent être de différentes formes (rectangle ou circulaire). Il existe d'ailleurs des systèmes de filtres autonettoyants qui, par rotation des toiles (circulaires) autour de l'axe, permettent de détacher le gâteau de filtration et de l'évacuer.

Du fait de leur principe même, ces filtres peuvent laisser passer des particules solides de tailles plus ou moins importantes. Ceci s'explique par un gâteau de filtration insuffisamment formé (en début de cycle) ou par des fissures (pression d'alimentation trop forte). Pour cette raison, les filtres à toiles métalliques doivent impérativement être doublés d'un filtre principal pour garantir une qualité satisfaisante d'huile carburant.

♦ *Les filtres automatiques autonettoyants*

Cette filtration sous pression va de 1 mm à 30 µm de finesse. L'huile issue de la presse est envoyée sous pression dans un panier perforé de finesse voulue disposé verticalement. Un système de racloir permet d'entraîner les particules solides retenues dans la partie inférieure où elles seront ensuite évacuées. Pour obtenir une qualité satisfaisante d'huile carburant, il sera nécessaire de réaliser par la suite une filtration plus fine.

♣ Filtration principale

♦ *Les filtres à plaques*

Ces filtres fonctionnent sur le même principe que les filtres presses mais avec des plaques filtrantes cellulosiques. Par contre, la formation du gâteau, qui est très lente, ne joue aucun rôle dans la filtration ; ce sont les toiles de cellulose qui jouent le rôle de filtre.

La succession de plaques, recouvertes de toiles filtrantes, serrées par un vérin hydraulique constitue le volume du filtre. L'huile non filtrée est envoyée sous pression entre les plaques. Elle se retrouve alors entre deux parois filtrantes, l'huile filtrée passe à l'intérieur de la plaque pour être ensuite évacuée soit par des robinets à l'extrémité de chaque plaque soit par une canalisation en bout de filtre. Quand l'intervalle entre plaques est rempli de matière solide, le pompage de l'huile est de plus en plus difficile et la pression augmente. Il faut alors arrêter la filtration et désolidariser les plaques pour nettoyer le gâteau de filtration. Toutes ces opérations peuvent bien entendu être automatisées.

Ces types de filtres, suivant la finesse des toiles, permettent d'obtenir des qualités d'huile carburant suffisantes. Les filtres à plaques de cellulose, matériels très fiables, présentent cependant l'inconvénient d'être encombrants et chers.

♦ *Filtres à membrane*

Le principe de fonctionnement est le même que les filtres à plaques dans la première phase. La différence est qu'arrivée à une certaine pression d'huile (7 bars en général), la filtration est stoppée et une membrane avec de l'air ou du liquide se gonfle à l'intérieur de la chambre de filtration (entre 2 plaques) réduisant le volume occupé par le « gâteau de filtration » et permettant une meilleure extraction d'huile contenue dans le dépôt solide.

♦ *Filtres combinant la centrifugation et la filtration par média filtrant*

Ce sont des filtres autonettoyants qui permettent de filtrer de 5 mm à 0,2 µm. Cette filtration allie un sac cylindrique à base de matière filtrante à la force centrifuge appliquée au mélange à filtrer. Le choix de la finesse du « sac de filtration » dépend du gradient de taille des particules à extraire de l'huile.

♦ *Filtration par cartouche*

La filtration par cartouche est essentiellement utilisée comme filtration finale, elle peut être associée à la décantation ou aux autres types de filtres décrits ci-dessus. Compte-tenu de sa faible surface de filtration, avec une huile fortement chargée, la cartouche se colmaterait très rapidement ; c'est pourquoi ce type de filtre n'est pas conseillé pour une filtration primaire ou principale.

✯ *Dégommage de l'huile*

(VAÏTILINGOM G., 1996))

Comme nous le verrons dans la partie suivante, l'utilisation de l'huile végétale pure en tant que carburant ou combustible nécessite d'obtenir une huile « propre », avec notamment un très faible taux de phosphore, responsable d'encrassements importants dans les moteurs. Nous l'avons vu précédemment, la pression à froid des graines permet d'éviter à la base une extraction trop importante de phospholipides.

La décantation peut aussi permettre d'en éliminer une partie (malgré d'autres inconvénients de ce procédé). La centrifugation reste sans aucun doute la meilleure solution et la plus efficace, mais son prix est vite dissuasif pour une petite unité de production à la ferme.

Si malgré une pression à froid et une éventuelle décantation, on souhaite éliminer le maximum de gommes (phospholipides) de l'huile, il sera nécessaire de la dégommer. À l'échelle artisanale, pour une capacité de production moyenne d'environ 100 litres d'huile par heure, l'appareil doit être abordable financièrement, de conception et d'utilisation simples, sans contraintes réglementaires de manipulation des produits, et permettre de garantir une teneur maximale de 20 ppm de phospholipides.

D'après le CREOL[26] et le CIRAD[27], le dégommeur le plus adapté fonctionne sur le principe des **terres adsorbantes**. Ces substances sont capables d'adsorber superficiellement des composés de l'huile, en l'occurrence les gommes. Les différents essais réalisés ont retenu une silice synthétique comme adsorbant, dénommée Trisyl® 300.

Les phospholipides, comme les savons sont de nature amphiphile, c'est-à-dire qu'ils contiennent une partie hydrophobe et une partie hydrophile :

- Les **phospholipides facilement hydratables** (partie hydrophile) sont adsorbés facilement sur des silices présentant une grande surface de contact ;
- Les **phospholipides non hydratables** (partie hydrophobe) seront adsorbés par des silices à pores de grands diamètres (comme Trisyl® 300) permettant aux micelles formées d'atteindre la surface adsorbante.

Le CIRAD a mené une étude sur ce procédé, pour mettre au point un itinéraire technique. Dans un premier temps, il a fallu définir la part optimale d'adsorbant à utiliser. Une teneur de 1 % de Trisyl® 300 apparaît comme un bon compromis efficacité/coût (ce produit coûtait à l'époque de l'étude 13,80 F/kg, soit 2,10 €/kg).

La silice est dosée puis incorporée à l'huile dans un bac de mélange. L'homogénéisation, qui sera plus ou moins longue selon la teneur en phosphore de départ, pourra être suivie d'une décantation pour améliorer le résultat final. Un temps de mélange de 10 à 30 minutes suivi d'une décantation jusqu'à 40 minutes donnera d'excellents résultats. Le tout est ensuite pompé puis filtré à 10 µm au minimum afin de retenir le phosphore lié à la silice.

Les résultats ont montré qu'un temps de contact huile - silice long plutôt qu'un pompage - filtration énergique permettait d'obtenir une meilleure efficacité (jusqu'à 58 % de phosphore en moins). Attention toutefois à réaliser une filtration de qualité car la silice est tout aussi indésirable que le phosphore dans les organes d'injection de carburant.

[26] CREOL : Centre de Recherche et d'Expérimentation sur les Oléagineux (contact : M. Patrick CARRÉ).

[27] CIRAD : Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (contact : M. Gilles VAÏTILINGOM).

✯ *Décirage de l'huile de tournesol*

(CLEMENT T. et al., 2003)

♦ *Teneurs en cires des huiles de tournesol*

La teneur en cires peut varier en fonction de l'origine de l'huile, des caractéristiques de la graine de tournesol et de sa maturité, de la présence d'un atelier de décortication avant la trituration, de la température d'extraction et de la teneur résiduelle en huile des tourteaux. La teneur en cires de l'huile peut atteindre 1500 ppm, voire 3500 ppm pour des graines qui ne sont pas décortiquées avant trituration. En revanche, cette teneur peut descendre à quelques 200 ou 300 ppm pour certaines huiles provenant de graines bien décortiquées avant trituration. Les huiles raffinées ont une teneur en cires qui peut varier de 10 à 100 ppm.

Une huile bien wintérisée[28] et brillante aura une teneur en cires de 10 à 20 ppm et une tenue au froid au-delà de 48 heures à 0°C. Une huile seulement décirée aura une teneur en cires de l'ordre de 100 ppm et une tenue au froid de l'ordre de 5h1/2 à 0°C, ce qui est suffisant pour un climat modéré.

Diverses méthodes sont employées pour parvenir à éliminer les cires, mais le principe reste le même quelle que soit la méthode utilisée. L'huile est refroidie afin de provoquer la cristallisation des cires, puis les cristaux sont séparés de l'huile. Lors du décirage, la cristallisation s'effectue en deux étapes :

- un **refroidissement** jusqu'à une température de l'ordre de 5 à 10°C ;
- une **maturation** de plusieurs heures afin de permettre la cristallisation complète et la formation de cristaux assez gros pour faciliter la séparation.

♦ *Les techniques de décirage de l'huile de tournesol*

Les techniques employées sont :

- le décirage par **filtration** ou **wintérisation** : ce système est utilisé sur des huiles à faible teneur en cires (environ 600 ppm), et là où le consommateur désire une huile brillante avec une tenue au froid parfaite ; il ne résout pas le problème du résidu solide des gâteaux de filtration, problème qui se complique de jour en jour ;
- le décirage par **centrifugation** ;
- le décirage par **démucilagination à froid** ;
- le décirage par **refroidissement après neutralisation** ;
- le décirage par **neutralisation partielle et refroidissement**.

Ces différents systèmes donnent une teneur en cires de l'ordre de 100 ppm. Cette qualité satisfait aux critères d'un climat tempéré, mais elle est insuffisante si le consommateur exige une huile brillante avec une tenue au froid parfaite : il faut dans ce cas passer à l'étape de wintérisation. Les pertes peuvent être maintenues à un niveau acceptable à condition d'exercer un contrôle rigoureux des conditions de process. L'emploi de séparateurs procure toujours une phase aqueuse lourde et par conséquent un problème de traitement d'effluents.

[28] Wintérisation : cf. techniques de décirage.

La méthode de décirage par filtration ou wintérisation est le moyen le plus employé pour des huiles ne dépassant pas 600 ppm de cires. Le refroidissement s'effectue par paliers car une trop grande différence de température entre l'huile et le fluide réfrigérant engendre un dépôt de cires sur les échangeurs. Le protocole utilisé comporte donc deux étapes, une étape de refroidissement pour atteindre la sursaturation, et une étape de maturation afin d'obtenir une bonne croissance des cristaux, évitant ainsi les dépôts de cires. Un adjuvant peut être utilisé afin de faciliter la filtration. L'huile est ensuite conduite dans un maturateur où elle est maintenue à basse température (4 à 6°C) pendant plusieurs heures sous agitation lente. Elle subit un réchauffement à 17°C afin de diminuer sa viscosité, puis elle est filtrée.

Dans le cas des cires de tournesol, la cristallisation ne se fait que lorsque la solution est largement sursaturée et après un temps assez long. La présence de phospholipides et leur incrustation ne semblent pas présenter de risque pour la croissance des cristaux de cires.

Avant la filtration, il est donc recommandé de laisser décanter l'huile au minimum 2 à 3 semaines dans une cuve en inox munie d'un fond conique et d'un tirage au clair. L'amélioration de cette étape passe par l'adaptation de cuves réfrigérées permettant une meilleure cristallisation, pour atteindre une température d'environ 10°C mais entraînant un coût d'investissement supplémentaire. Lors de la filtration, il est généralement conseillé de soutirer l'huile de la cuve vers le filtre par l'intermédiaire d'une pompe centrifuge tournant au maximum à 900 trs/mn.

À titre indicatif, il existe des procédés utilisant la technique de microfiltration. Des essais réalisés au laboratoire du CIRAD avec des huiles de tournesol contenant 2 600 ppm ont montré que par microfiltration sur des membranes dont le diamètre des pores va de 0,05 µm à 1 µm sur fibre polyéthylène à 10°C, sous une pression de 2 bars et un flux de 10 L/m²/h, le perméat ne contenait plus que 30 ppm de cires.

♣ Dosage des cires

♦ *La mesure qualitative*

Cette mesure de la teneur en cires est effectuée par le *cold test*. Les échantillons d'huile sont fondus et placés dans des tubes en verre de 15 ml parfaitement nettoyés et immergés dans un bain thermostaté à 10°C pendant 24 heures. Le trouble est observé toutes les heures à partir de la 17ème heure, et le test est considéré positif si on ne détecte pas de trouble au bout de 24 heures.

♦ *La détermination des cires*

La détermination des cires a longtemps été réalisée par des méthodes *gravimétriques* ou *turbidimétriques*, qui ne donnent satisfaction qu'aux fortes teneurs. La méthode de *chromatographie en phase gazeuse* permet la détermination de la teneur en cires présentes dans l'huile. Elle s'effectue en deux temps : passage sur colonne de silice afin de préparer l'échantillon, puis analyse chromatographique.

Par exemple, une huile présentant un total de cires non cristallisables de 165 ppm et un total de cires cristallisables de 402 ppm (soit 567 ppm au total) révèlera un cold test négatif (apparition d'un trouble).

Échantillon	Valeur initiale	Après 6 mois	Après 1 an
A	0,92	0,92	0,94
B		1,25	1,37
C		1,13	1,14
D		1,11	1,20
E		1,01	1,08

Tableau 18 : Évolution de l'indice d'acide.

Échantillon	Valeur initiale	Après 6 mois	Après 1 an
A	1	1	5
B		48	728
C		5,8	38
D		6,4	200
E		1,2	16

Tableau 19 : Évolution de l'indice de peroxyde.

2.2.3.3 Stockage de l'Huile Végétale Pure

L'huile est un produit « vivant » qui va évoluer dans le temps. Il est donc impératif de fournir des conditions de stockage les plus favorables possible :

- faible taux d'impuretés dans l'huile ;
- basses températures ;
- éviter les variations de température (et donc la condensation d'eau) ;
- à l'abri de l'air et de l'humidité (les cuves métalliques seront donc préférables aux cuves plastiques) ;
- cuves facilement nettoyables.

Certains paramètres chimiques de l'huile ont été suivis dans le temps : l'indice d'acide, l'indice de peroxyde et l'indice d'iode. *(JOYE P., 2003)*

✯ *Indice d'acide*

L'évolution dans le temps de ce paramètre a été étudiée pour des échantillons conservés dans des conditions différentes :

- **échantillon A :** huile conservée au réfrigérateur, à l'abri de l'air et de la lumière (échantillon de référence) ;
- **échantillon B :** huile conservée à température ambiante, à la lumière et en contact avec l'air ;
- **échantillon C :** huile conservée à température ambiante, à la lumière et à l'abri de l'air ;
- **échantillon D :** huile conservée à température ambiante, à l'abri de la lumière et en contact avec l'air ;
- **échantillon E :** huile conservée à température ambiante, à l'abri de la lumière et de l'air.

Les résultats, après 6 mois et 1 an, sont reportés dans le tableau ci-contre (*Tableau 18*). On remarque que le contact de l'air a une influence plus importante sur l'acidification de l'huile que la lumière. Les valeurs restent cependant dans des conditions acceptables (<2).

✯ *Indice de peroxyde*

L'évolution dans le temps de ce paramètre a été étudiée avec les mêmes échantillons (A à E) que précédemment. Les résultats après 6 mois et 1 an sont reportés dans le tableau ci-contre (*Tableau 19*).

Ces résultats illustrent bien ce qui avait été mentionné ci-dessus : après un départ lent, le phénomène s'accélère rapidement pour atteindre, dans le cas de l'échantillon conservé dans les plus mauvaises conditions (B : température ambiante, à la lumière et au contact de l'air), des valeurs importantes après un an. Pour ce paramètre également, on observe une plus forte influence de l'air que de la lumière.

Échantillon	Valeur initiale	Après 6 mois	Après 1 an
A	100	99,7	99,2
B		94,6	54,7
C		97,3	95,8
D		89,3	84,8
E		97,8	97,1

Tableau 20 : Évolution de l'indice d'iode.

✯ *Indice d'iode*

L'évolution dans le temps de ce paramètre a encore été étudiée avec les mêmes échantillons (A à E) que précédemment. Les résultats après 6 mois et 1 an sont donnés dans le tableau ci-contre (*Tableau 20*).

Les baisses importantes de l'indice d'iode constatées pour les échantillons conservés en contact avec l'air (B et D) montrent que ces échantillons ont subi une oxydation importante.

En outre, cette oxydation permet d'augmenter l'indice de cétane de l'huile (augmentation du nombre de composés oxygénés), donc de faciliter son auto-inflammation et sa combustion. Mais cet avantage ne peut être retenu du fait des problèmes qu'engendrerait une augmentation de l'acidité de l'huile dans les moteurs.

De ces trois analyses (indices d'acide, de peroxyde et d'iode) du suivi dans le temps, il apparaît que le critère le plus important pour assurer une bonne conservation de l'huile est d'isoler celle-ci de l'air.

L'huile ne s'évapore pas, contrairement au gazole ou au fioul. Le risque d'émission de COV[29] est par conséquent nul. Ceci est un avantage de l'utilisation d'HVP car la forte volatilité du gazole (ou fioul) nécessite l'équipement des stations-service pour la récupération de ces vapeurs. De même, l'huile végétale élimine tout risque de pollution lors du remplissage des cuves ou des réservoirs ; l'huile étant biodégradable et même consommable en alimentation humaine, elle ne présente donc pas de risque de pollution diffuse contrairement aux carburants d'origine fossile.

[29] COV : Composés Organiques Volatils.

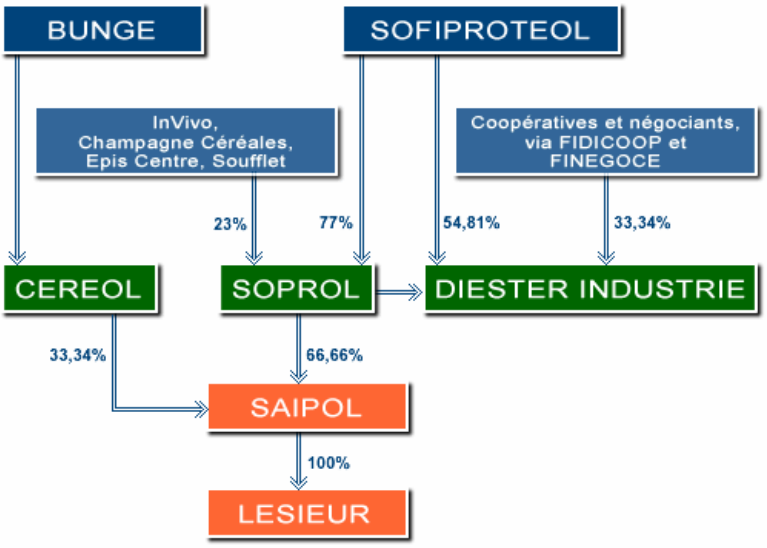


Figure 12 : Organisation du groupe SAIPOL - LESIEUR.
http://www.prolea.com/sofi/PRESENT/patrimoine.htm#

2.3 L'Ester Méthylique d'Huile Végétale

L'EMHV, ou biodiesel, est mieux connu sous le nom de la marque commerciale : Diester®.

2.3.1 Présentation de la filière Diester®

(Diester Industrie, 2004)

Diester Industrie, créé en 1993, organise la filière Diester® française et commercialise ses produits. La société Diester Industrie (*Figure 12*) est contrôlée à 66,66% par le groupe SOFIPROTEOL/SOPROL et à 33,34% par les holdings d'organismes stockeurs (FIDICOOP et FINEGOCE). Diester Industrie est donc l'émanation d'une démarche collégiale d'OS[30] dans le but d'écouler les productions d'oléagineux.

La société SAIPOL s'occupe de triturer les graines de colza et tournesol pour les usines d'estérification de Diester Industrie.

Les coopératives s'engagent, par contrat sur une durée de 3 ans avec la holding FIDICOOP[31], à collecter un minimum de surface. Les coopératives se doivent de livrer l'intégralité de la collecte prévue sous peine de ne pas recevoir une prime d'engagement de 20 à 25 €/ha de la part de Diester Industrie.

Les perspectives de production de la filière Diester® sont estimées à près de 900 000 tonnes de biodiesel d'ici à 2007/2008. Pour répondre à ce plan national, Diester Industrie et SAIPOL s'appuient sur le développement de 7 unités d'estérification :

- Grand Couronne (Seine-Maritime) 240 000 tonnes de Diester®
- Boussens (Haute-Garonne) 33 000 tonnes,
- Compiègne 1 (Oise) 100 000 tonnes,
- Compiègne 2 (Oise) 90 000 tonnes,
- Le Mériot (Aube) 130 000 tonnes,
- Saint-Nazaire (Loire-Atlantique) 120 000 tonnes,
- Sète (Hérault) 160 000 tonnes.

Pour les besoins de l'étude, nous nous intéresserons plus particulièrement à l'usine d'estérification de Sète qui est en cours de construction et qui devrait être opérationnelle début 2006 avec une production de 160 000 tonnes (évolution prévue à 200 000 t dans un second temps).

[30] OS : Organismes Stockeurs.

[31] FIDICOOP : FIDICOOP et FINEGOCE sont des sociétés holdings qui regroupent, au sein de Diester Industrie, l'actionnariat de la quasi-totalité des organismes collecteurs et stockeurs français de graines oléagineuses

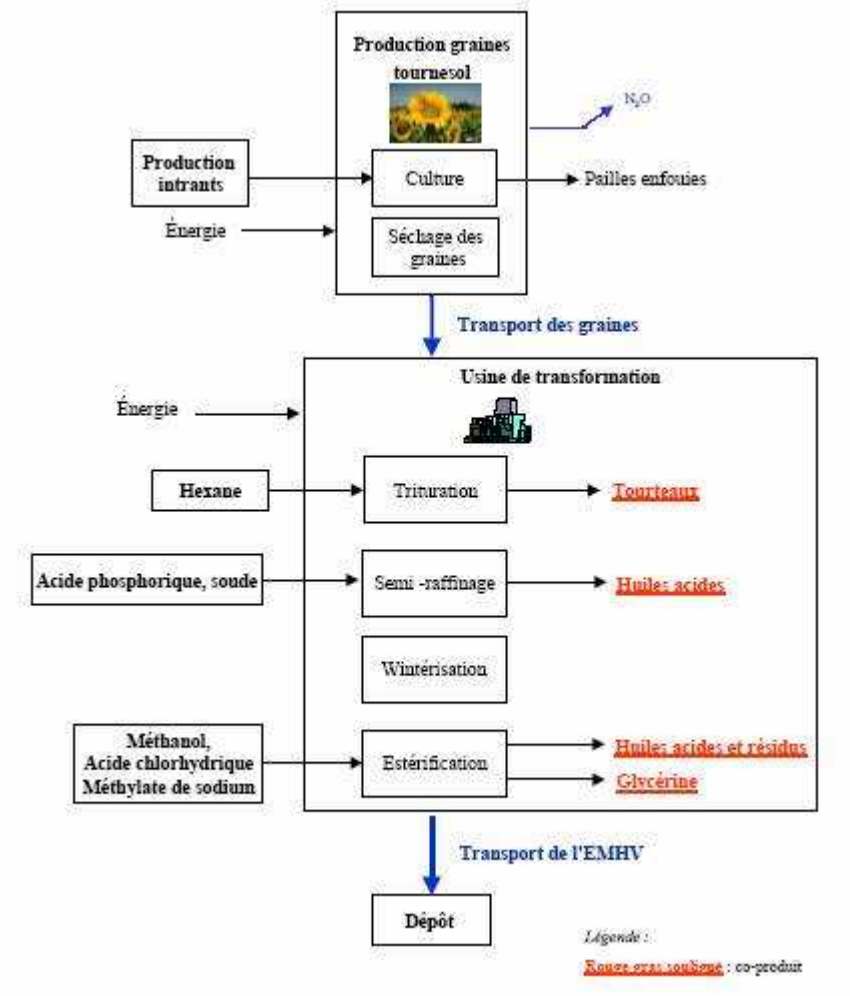


Figure 13 : Schéma des frontières du système de production d'EMHV de tournesol. ***(ECOBILAN, PRICEWATERHOUSECOOPERS, 2002)***

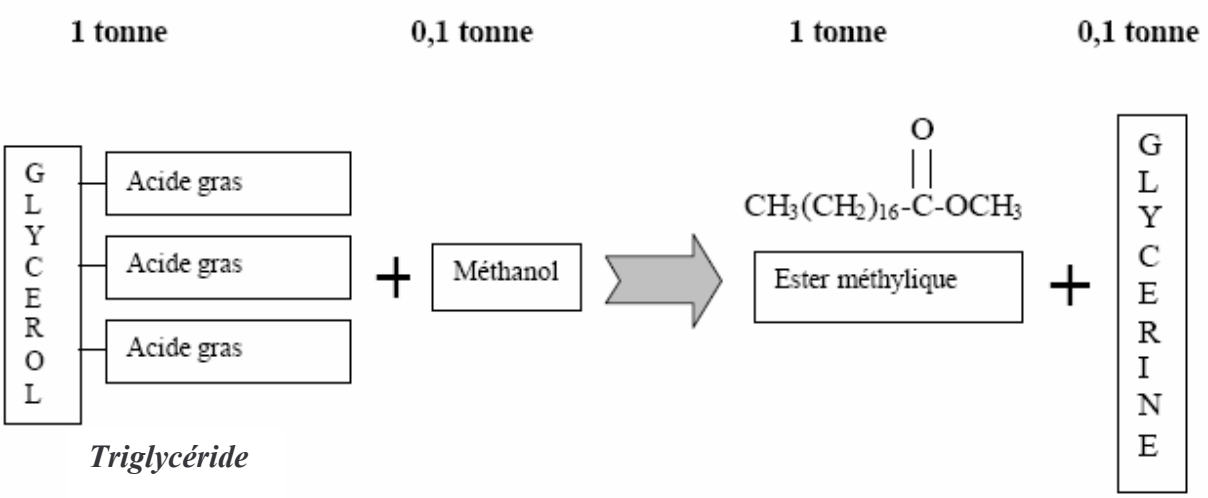


Figure 14 : Transestérification de l'huile et du méthanol en EMHV. ***(KAY F., 2004)***

2.3.2 Procédé de fabrication du Diester®

(ECOBILAN, PRICEWATERHOUSECOOPERS, 2002)

Le biodiesel, plus connu sous son nom commercial Diester®, est composé d'EMHV issu d'un processus chimique industriel. Le schéma ci-contre (*Figure 13*) représente les frontières du système de production d'EMHV à partir de tournesol. Les techniques de production de l'EMHV de tournesol sont voisines de celles du colza. La principale différence, en dehors des rendements spécifiques pour chacune des cultures est l'ajout dans le procédé de production d'une étape de Winterisation (procédé qui supprime les cires présentes dans l'huile de tournesol).

2.3.2.1 Trituration des oléagineux

Le procédé d'extraction de l'huile est réalisé en deux étapes : la pression puis l'extraction à l'aide d'un solvant (hexane). La pression, à chaud, permet d'extraire le maximum d'huile des graines mais il reste cependant dans les tourteaux un taux assez élevé d'huile, c'est pourquoi ces derniers sont lavés à l'hexane afin de solubiliser cette huile et de l'extraire. Cette opération permet un meilleur rendement d'extraction lors de la trituration et garantit des tourteaux à faible taux de matières grasses, de l'ordre de 2 %.

La trituration donne un rendement de 43,3 % d'huile et 56,7 % de tourteaux. L'huile est ensuite raffinée pour être estérifiée.

2.3.2.2 Semi-raffinage

Cette étape consiste à retirer les impuretés et l'acidité de l'huile brute pour faciliter les opérations d'estérification. Le rendement de cette étape est de près de 97 %, l'ajout d'acide phosphorique et de soude rend possible l'extraction de 3 % d'huile acide (coproduit valorisé dans l'industrie). L'huile brute ainsi semi-raffinée peut alors être estérifiée.

2.3.2.3 Estérification

Dans le cadre de l'unité d'estérification de Sète, Diester Industrie a retenu le procédé développé par l'IFP et commercialisé par sa filiale Axens sous le nom d'ESTERFIP-H™. En effet la technologie ESTERFIP a été développée par l'IFP au début des années 1990 et est déjà utilisée depuis 1992 pour la production de Diester® à Compiègne.

L'ESTERFIP-H™ présente une innovation majeure dans la production d'EMHV. Elle permet en effet une production conforme à la norme européenne (EN 14214) tout en assurant une pureté du coproduit, la glycérine, dont la valorisation reste un facteur déterminant de l'économie de cette filière.

L'EMHV de Diester Industrie est le résultat de la transestérification de l'huile semi-raffinée (triglycérides) et du méthanol, selon le procédé IFP (*Figure 14*). Cette réaction chimique permet d'obtenir 88 % d'EMHV à partir de l'huile brute semi-raffinée, soit un rendement total de 39,2 % d'EMHV pour les graines de colza et 41,8 % pour les graines de tournesol.

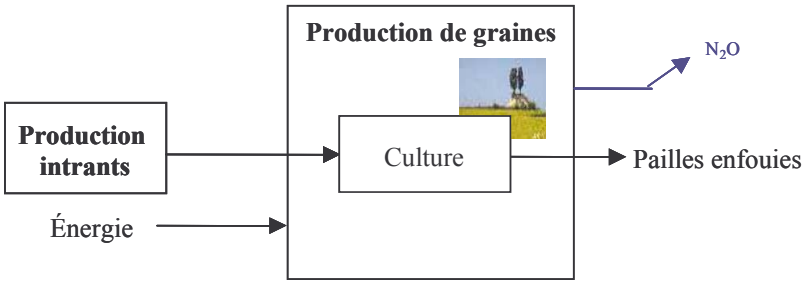


Figure 15 : Schéma des frontières de la production des graines.
(ECOBILAN, PRICEWATERHOUSECOOPERS, 2002)

2.4 Aspects énergétiques des biocarburants

2.4.1 Consommations énergétiques des cultures

Pour le calcul des rendements énergétiques des cultures de colza et tournesol, nous nous sommes basés sur l'étude des « *bilans énergétiques et gaz à effet de serre des filières de production de biocarburants* » réalisée par Écobilan - PricewaterhouseCoopers.

La synthèse des intrants agricoles (engrais N,P,K et produits phytosanitaires), la mécanisation des itinéraires techniques (consommation de carburant des outils agricoles) et les impacts évités en apport d'engrais P et K liés à l'enfouissement des pailles ont été pris en compte. Cette étude fournit aussi le contenu énergétique des intrants agricoles comprenant l'énergie des phases d'élaboration et de distribution de l'intrant (*Figure 15*).

Pour le calcul des bilans énergétiques, nous nous sommes servi des itinéraires techniques issus des fermes-types Rhône-Alpes d'ARVALIS - Institut du végétal. *(SAINT-CYR C., 2004)*

Nous allons détailler les bilans énergétiques des cultures de colza et tournesol pour deux départements rhônalpins : l'Ain et la Drôme. Pour la ferme-type « Limons » (département de l'Ain), le temps de traction hors récolte représente 4,4 h/ha et 70 litres de fioul consommés par hectare. De même, pour la ferme type « plaine de Valence », le temps de traction hors récolte est quant à lui de 5,22 h/ha et 52,5 litres de fioul par hectare. La consommation de fioul pour la récolte est la même référence qu'Écobilan, à savoir 15 l/ha.

2.4.1.1 Le colza

✯ *Le département de l'Ain*

Le rendement déterminé pour la ferme type « Limons » est de 35 q/ha. Les principales étapes de l'itinéraire cultural moyen sont les suivantes :

- déchaumage de la culture précédente ;
- labour ;
- semis en combiné : densité moyenne de 3 kg/ha ;
- engrais : 170 uN[32]/, 45,5 uP et 35 uK[33] ;
- insecticides :
  - Mageos 2 x 50 g/ha (150 g MA[34]/kg);
  - Mesurol 0,8 x 2 kg/ha (40 g MA/l) ;

[32] uX : unité de X équivalent à 1 kg, N pour l'azote, P pour le phosphore et K pour la potasse.

[33] Dans le cas du colza, la teneur en P_2O_5 et en K_2O dans les grains est de 1,3 % et 1 %. Dans le bilan effectué pour chaque culture, seule la part d'engrais de fond réellement utilisée par les parties exportées de la culture sont prises en compte.

[34] MA : Matière Active.

AIN *COLZA*	Quantité	Énergie *(MJ/unité)*	Énergie non renouvelable *(MJ/ha)*	%
Engrais				
- N	170,0 kg N	52,4	8 908	64%
- P	45,5 kg P_2O_5	18,3	833	6%
- K	35,0 kg K_2O	11,6	406	3%
sous-total engrais			*10 147*	*73%*
Phytosanitaires				
- herbicide	1,46 kg MA	256	374	3%
- fongicide	0,05 kg MA	175	8	0%
- insecticide	0,08 kg MA	576	46	0%
- régulateur	0,14 kg MA	241	33	0%
sous-total phytosanitaires			*461*	*3%*
Mécanisation				
- tracteur	70,0 l/ha	39,3	2 751	20%
- automotrice	15,0 l/ha		590	4%
sous-total mécanisation	*85,0 l/ha*		*3 341*	*24%*
Total ITK			**13 948**	100%

Tableau 21 : Itinéraire-type et consommations d'énergie du colza dans l'Ain. ***(ARVALIS, 2004)***

DRÔME *COLZA*	Quantité	Énergie *(MJ/unité)*	Énergie non renouvelable *(MJ/ha)*	%
Engrais				
- N	130,0 kg N	52,4	6 812	62%
- P	36,4 kg P_2O_5	18,3	666	6%
- K	28,0 kg K_2O	11,6	325	3%
sous-total engrais			*7 803*	*71%*
Phytosanitaires				
- herbicide	1,86 kg MA	256	476	4%
- fongicide	0,26 kg MA	175	46	0%
- insecticide	0,06 kg MA	576	35	0%
- régulateur	0,00 kg MA	241	0	0%
sous-total phytosanitaires			*558*	*5%*
Mécanisation				
- tracteur	52,5 l/ha	39,3	2 063	19%
- automotrice	15,0 l/ha		590	5%
sous-total mécanisation	*67,5 l/ha*		*2 653*	*24%*
Total ITK			**11 013**	100%

Tableau 22 : Itinéraire-type et consommations d'énergie du colza dans la Drôme. ***(ARVALIS, 2004)***

- herbicides :
  - Nimbus 3 l/ha (283,3 g MA/l) ;
  - Glyphosate 1,7 l/ha (360 g MA/l) ;
- fongicide :
  - Caramba 0,8 x 1 l/ha (60 g MA/l);
- régulateur de croissance :
  - Parlay 0,3 x 1 l/ha ((450 g MA/l);
- récolte.

L'itinéraire technique détaillé mobilise près de 14 000 MJ[35]/ha d'énergie non renouvelable, liés à 64% aux apports d'engrais azotés ().

✯ *Le département de la Drôme*

Le rendement déterminé pour la ferme-type « plaine de Valence » est de 28 q/ha. Les principales étapes de l'itinéraire cultural moyen sont les suivantes :

- déchaumage de la culture précédente ;
- labour ;
- semis en combiné : densité moyenne de 3 kg/ha ;
- roulage ;
- engrais : 130 uN, 36,4 uP et 28 uK ;
- insecticides :
  - Décis 2 x 0,18 l/ha (25 g MA/l) ;
  - Karaté K 0,5 l/ha (105 g MA/l) ;
- herbicides :
  - Treflan 2 l/ha (480 g MA/l) ;
  - Napropamide 2 l/ha (450 g MA/l) ;
- fongicide :
  - Punch 0,7 l/ha (375 g MA/l) ;
- récolte.

L'itinéraire technique mobilise près de 11 000 MJ/ha d'énergie non renouvelable, liés à 62% aux apports d'engrais azotés (*Tableau 22*).

[35] MJ : MégaJoule.

AIN *TOURNESOL*	Quantité	Énergie *(MJ/unité)*	Énergie non renouvelable *(MJ/ha)*	%
Engrais				
- N	60,0 kg N	48,8	2 928	35%
- P	36,0 kg P_2O_5	18,3	659	8%
- K	27,0 kg K_2O	11,6	313	4%
sous-total engrais			*3 900*	*47%*
Phytosanitaires				
- herbicide	3,78 kg MA	256	968	12%
- fongicide	0,00 kg MA	175	0	0%
- insecticide	0,12 kg MA	576	69	1%
- régulateur	0,00 kg MA	241	0	0%
sous-total phytosanitaires			*1 037*	*13%*
Mécanisation				
- tracteur	70,0 l/ha	39,3	2 751	33%
- automotrice	15,0 l/ha		590	7%
sous-total mécanisation	*85,0 l/ha*		*3 341*	*40%*
Total ITK			**8 278**	100%

Tableau 23 : Itinéraire-type et consommations d'énergie du tournesol dans l'Ain. ***(ARVALIS, 2004)***

DRÔME *TOURNESOL*	Quantité	Énergie *(MJ/unité)*	Énergie non renouvelable *(MJ/ha)*	%
Engrais				
- N	43,0 kg N	48,8	2 098	32%
- P	36,0 kg P_2O_5	18,3	659	10%
- K	27,0 kg K_2O	11,6	313	5%
sous-total engrais			*3 070*	*47%*
Phytosanitaires				
- herbicide	2,90 kg MA	256	742	11%
- fongicide	0,00 kg MA	175	0	0%
- insecticide	0,06 kg MA	576	35	1%
- régulateur	0,00 kg MA	241	0	0%
sous-total phytosanitaires			*776*	*12%*
Mécanisation				
- tracteur	52,5 l/ha	39,3	2 063	32%
- automotrice	15,0 l/ha		590	9%
sous-total mécanisation	*67,5 l/ha*		*2 653*	*41%*
Total ITK			**6 500**	100%

Tableau 24 : Itinéraire-type et consommations d'énergie du tournesol dans la Drôme. ***(ARVALIS, 2004)***

2.4.1.2 Le tournesol

✯ *Le département de l'Ain*

Le rendement déterminé pour la ferme type « Limons » est de 30 q/ha. Les principales étapes de l'itinéraire cultural moyen sont les suivantes :

- déchaumage de la culture précédente ;
- labour ;
- reprise de labour ;
- semis : densité moyenne de 70 000 grains/ha ;
- engrais : 60 uN, 36 uP et 27 uK[36] ;
- insecticides :
  - Best 0,3 x 1,25 l/ha (105 g MA/kg) ;
  - Mesurol Pro 2 kg/ha (40 g MA/l) ;
- herbicides :
  - Mercantor Gold 1,4 l/ha (960 g MA/l) ;
  - Nikeyl 0,5 x 3,5 l/ha (444 g MA/l) ;
  - Challenge 0,5 x 3,5 l/ha (600 g MA/l) ;
  - Glyphosate 1,7 l/ha (360 g MA/l) ;
- récolte.

La culture de tournesol représente une mobilisation d'énergie non renouvelable de plus de 8 000 MJ. Cette mobilisation énergétique est liée à 35% aux apports en engrais azotés et à 40% à la mécanisation (*Tableau 23*).

✯ *Le département de la Drôme*

Le rendement déterminé pour la ferme type « plaine de Valence » est de 30 q/ha. Les principales étapes de l'itinéraire moyen sont les suivantes :

- déchaumage de la culture précédente ;
- labour ;
- reprise de labour ;
- semis : densité moyenne de 70 000 grains/ha ;
- engrais : 43 uN, 36 uP et 27 uK[37] ;
- insecticide :
  - Mesurol Pro 1,5 kg/ha (40 g MA/l) ;
- herbicides :
  - Mercantor Gold 1,4 l/ha (960 g MA/l) ;
  - Nikeyl 3,5 l/ha (444 g MA/l) ;
- récolte.

La culture de tournesol représente une mobilisation d'énergie non renouvelable de 6 500 MJ, dont 32% sont liés aux apports d'engrais azotés et 41% à la mécanisation (*Tableau 24*).

[36] Dans le cas du tournesol, la teneur en P_2O_5 et en K_2O dans les grains est de 1,2 % et 0,9 %.
[37] Dans le cas du tournesol, la teneur en P_2O_5 et en K_2O dans les grains est de 1,2 % et 0,9 %.

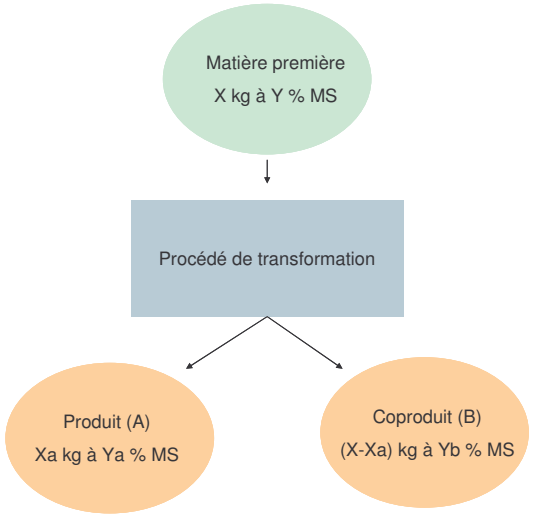


Figure 16 : Allocations massiques des différents produits.
(ECOBILAN, PRICEWATERHOUSECOOPERS, 2002)

AIN *EMHV colza*	Quantité	Énergie *(MJ/unité)*	Énergie non renouvelable *(MJ/ha)*	%
Culture	0,985 kg graine	3,99	3,925	36%
Stockage Séchage	0,985 kg graine	0,15	0,146	1%
Transport	0,985 kg graine	0,09	0,091	1%
Trituration	0,905 kg huile b	1,19	1,073	10%
Semi raffinage	0,905 kg huile n	0,34	0,309	3%
Méthanol	0,099 kg méthanol	32,72	3,240	30%
Estérification	1,000 kg EMHV	1,98	1,978	18%
Distribution	1,000 kg EMHV	0,08	0,083	1%
Total ENR	*MJ/kg huile*		*10,844*	*100%*
Rendement énergétique			**3,45**	

Tableau 25 : Consommations énergétiques de la production d'EMHV à partir du colza de l'Ain.
(ECOBILAN, PRICEWATERHOUSECOOPERS, 2002)

2.4.2 Bilans énergétiques des biocarburants

Pour calculer les rendements énergétiques des filières de production des biocarburants (HVP et EMHV), les étapes prises en compte sont :

- la culture,
- le séchage / stockage,
- l'approvisionnement / transport,
- les procédés de transformation,
- la synthèse de produits chimiques (pour l'EMHV).

Les filières étudiées ont la particularité de présenter de nombreux coproduits tout au long des étapes de production. Conformément à la norme ISO 1404, la prise en compte des coproduits a suivi la règle de l'allocation massique. Cette règle est retenue aux différentes étapes, lorsque le process conduit à produire, outre le produit de l'étude, un autre produit qui est également valorisé.

Cette allocation de matière première pour le produit étudié se calcule au prorata de la matière sèche (*Figure 16*).

$$\text{Rapport d'allocation (\%)} = \frac{Xa \times Ya}{(Xa \times Ya) + ((X - Xa \times Yb)}$$

Le rendement énergétique se calcul comme suit :

$$\text{Rendement énergétique} = \frac{\text{PCI du biocarburant } \textit{(MJ/kg)}}{\text{ENR}^{38} \text{ mobilisée pour un kg de biocarburant}}$$

2.4.2.1 Bilan énergétique de l'EMHV

Pour l'EMHV, les hypothèses de départ sont :

- tourteaux à 2 % MG et 89 % MS ;
- transport : environ 150 km ;
- PCI de l'EMHV de colza = 37,39 MJ/kg ;
- PCI de l'EMHV de tournesol = 37,02 MJ/kg.

✯ *EMHV de colza*

Le rendement d'huile brute est de 43,1 %. En considérant cette huile brute à 100 % de matière sèche, le rapport d'allocation massique est de 46 %[39] ; de même, le rapport d'allocation massique entre l'huile brute et l'huile neutre est de 97 %.

[38] ENR : Énergie Non Renouvelable.

[39] Les pourcentages d'allocation correspondent aux pourcentages des consommations affectés au produit intéressant l'étude.

DRÔME *EMHV colza*	Quantité	Énergie (*MJ/unité)*	Énergie non renouvelable (*MJ/ha)*	%
Culture	0,985 kg graine	3,93	3,874	36%
Stockage Séchage	0,985 kg graine	0,15	0,146	1%
Transport	0,985 kg graine	0,09	0,091	1%
Trituration	0,905 kg huile b	1,19	1,073	10%
Semi raffinage	0,905 kg huile n	0,34	0,309	3%
Méthanol	0,099 kg méthanol	32,72	3,240	30%
Estérification	1,000 kg EMHV	1,98	1,978	18%
Distribution	1,000 kg EMHV	0,08	0,083	1%
Total ENR	*MJ/kg huile*		*10,793*	*100%*
Rendement énergétique			**3,46**	

Tableau 26 : Consommations énergétiques de la production d'EMHV à partir du colza de la Drôme.
(ECOBILAN, PRICEWATERHOUSECOOPERS, 2002)

AIN *EMHV tournesol*	Quantité	Énergie (*MJ/unité)*	Énergie non renouvelable (*MJ/ha)*	%
Culture	0,985 kg graine	2,759	2,718	28%
Stockage Séchage	0,985 kg graine	0,148	0,146	2%
Transport	0,985 kg graine	0,092	0,091	1%
Trituration	0,905 kg huile b	1,186	1,073	11%
Semi raffinage	0,905 kg huile n	0,341	0,309	3%
Méthanol	0,099 kg méthanol	32,723	3,240	34%
Estérification	1,000 kg EMHV	1,978	1,978	21%
Distribution	1,000 kg EMHV	0,083	0,083	1%
Total ENR	*MJ/kg huile*		*9,636*	*100%*
Rendement énergétique			**3,84**	

Tableau 27 : Consommations énergétiques de la production d'EMHV à partir du tournesol de l'Ain.
(ECOBILAN, PRICEWATERHOUSECOOPERS, 2002)

♣ Le département de l'Ain

Avec les données énergétiques de l'itinéraire technique de l'Ain, 3,45 MJ d'énergie sont restitués par MJ d'énergie non renouvelable mobilisée pour la production d'un kilogramme d'EMHV de colza ().

La consommation d'énergie non renouvelable vient principalement des ressources utilisées par la culture (36 %), de l'utilisation du méthanol (30 %), de l'estérification (18 %) et de la trituration à chaud (10 %).

♣ Le département de la Drôme

Avec les données énergétiques de l'itinéraire technique de la Drôme, 3,46 MJ d'énergie sont restitués par MJ d'énergie non renouvelable mobilisée pour la production d'un kilogramme d'EMHV de colza (*Tableau 26*).

La consommation d'énergie non renouvelable vient principalement des ressources utilisées par la culture (36 %), de l'utilisation du méthanol (30 %), de l'estérification (18 %) et de la trituration à chaud (10 %).

☆ *EMHV de tournesol*

Le rendement d'huile brute est de 46,1 %. En considérant toujours l'huile à 100 % de matière sèche, le rapport d'allocation massique est de 49 %, de même le rapport d'allocation massique entre l'huile brute et l'huile neutre est de 97 %.

♣ Le département de l'Ain

Près de 3,84 MJ d'énergie sont restitués par MJ d'énergie non renouvelable mobilisée pour la production d'un kilogramme d'EMHV de tournesol (*Tableau 27*).

La consommation d'énergie non renouvelable vient principalement de l'utilisation du méthanol (34 %), des ressources utilisées par la culture (28 %), de l'estérification (21 %) et de la trituration à chaud (11 %).

♣ Le département de la Drôme

Près de 4,09 MJ d'énergie sont restitués par MJ d'énergie non renouvelable mobilisée pour la production d'un kilogramme d'EMHV de tournesol (*Tableau 28*).

La consommation d'énergie non renouvelable vient principalement de l'utilisation du méthanol (36 %), des ressources utilisées par la culture (24 %), de l'estérification (22 %) et de la trituration à chaud (12 %).

DRÔME *EMHV tournesol*	Quantité	Énergie (*MJ/unité*)	Énergie non renouvelable (*MJ/ha*)	%
Culture	0,985 kg graine	2,167	2,134	24%
Stockage Séchage	0,985 kg graine	0,148	0,146	2%
Transport	0,985 kg graine	0,092	0,091	1%
Trituration	0,905 kg huile b	1,186	1,073	12%
Semi raffinage	0,905 kg huile n	0,341	0,309	3%
Méthanol	0,099 kg méthanol	32,723	3,240	36%
Estérification	1,000 kg EMHV	1,978	1,978	22%
Distribution	1,000 kg EMHV	0,083	0,083	1%
Total ENR	*MJ/kg huile*		*9,053*	*100%*
Rendement énergétique			**4,09**	

Tableau 28 : Consommations énergétiques de la production d'EMHV à partir du tournesol de la Drôme.
(ECOBILAN, PRICEWATERHOUSECOOPERS, 2002)

AIN *HVP colza*	Quantité	Énergie (*MJ/unité*)	Énergie non renouvelable (*MJ/ha*)	%
Culture	1,066 kg graine	3,985	4,249	88,9%
Stockage Séchage	1,066 kg graine	0,148	0,158	3,3%
Transport	1,066 kg graine	0,019	0,020	0,4%
Presse	1,066 kg graine	0,323	0,344	7,2%
Filtre 1	1 kg huile	0,003	0,003	0,1%
Filtre 2	1 kg huile	0,003	0,003	0,1%
Total ENR	*MJ/kg huile*		*4,777*	*100%*
Rendement énergétique			**7,79**	

Tableau 29 : Consommations énergétiques de la production d'HVP à partir du colza de l'Ain.
(ECOBILAN, PRICEWATERHOUSECOOPERS, 2002)

2.4.2.2 Bilan énergétique de l'HVP

Pour l'HVP, les hypothèses de départ sont :

- tourteaux à 16 % MG et 91 % MS ;
- transport : environ 30 km ;
- PCI HVP colza = 37,21 MJ/kg ;
- PCI HVP tournesol = 37,7 MJ/kg.

✯ *HVP de colza*

Pour l'HVP de colza, nous partons d'un rendement d'huile de 31 %. En considérant l'huile à 100 % MS, le rapport d'allocation massique est de 33 %. Le PCI de l'HVP de colza est de 37,21 MJ/kg.

♣ Le département de l'Ain

Le bilan énergétique est dans cette hypothèse de 7,79 MJ d'énergie restitués par MJ d'énergie non renouvelable mobilisée pour la production d'un kilogramme d'HVP de colza (*Tableau 29*).

La consommation d'énergie non renouvelable vient principalement des ressources utilisées par la culture (89 %).

♣ Le département de la Drôme

Le bilan énergétique est dans cette hypothèse de 7,88 MJ d'énergie restitués par MJ d'énergie non renouvelable mobilisée pour la production d'un kilogramme d'HVP de colza (*Tableau 30*).

La consommation d'énergie non renouvelable vient principalement des ressources utilisées par la culture (89 %).

DRÔME *HVP colza*	Quantité	Énergie (*MJ/unité*)	Énergie non renouvelable (*MJ/ha*)	%
Culture	1,066 kg graine	3,933	4,194	88,8%
Stockage Séchage	1,066 kg graine	0,148	0,158	3,3%
Transport	1,066 kg graine	0,019	0,020	0,4%
Presse	1,066 kg graine	0,323	0,344	7,3%
Filtre 1	1 kg huile	0,003	0,003	0,1%
Filtre 2	1 kg huile	0,003	0,003	0,1%
Total ENR	*MJ/kg huile*		*4,722*	*100%*
Rendement énergétique			**7,88**	

Tableau 30 : Consommations énergétiques de la production d'HVP à partir du colza de la Drôme.
(ECOBILAN, PRICEWATERHOUSECOOPERS, 2002)

AIN *HVP tournesol*	Quantité	Énergie (*MJ/unité*)	Énergie non renouvelable (*MJ/ha*)	%
Culture	1,063 kg graine	2,759	2,932	84,8%
Stockage Séchage	1,063 kg graine	0,148	0,157	4,5%
Transport	1,063 kg graine	0,019	0,020	0,6%
Presse	1,063 kg graine	0,323	0,343	9,9%
Filtre 1	1 kg huile	0,003	0,003	0,1%
Filtre 2	1 kg huile	0,003	0,003	0,1%
Total ENR	*MJ/kg huile*		*3,458*	*100%*
Rendement énergétique			**10,90**	

Tableau 31 : Consommations énergétiques de la production d'HVP à partir du tournesol de l'Ain.
(ECOBILAN, PRICEWATERHOUSECOOPERS, 2002)

DRÔME *HVP tournesol*	Quantité	Énergie (*MJ/unité*)	Énergie non renouvelable (*MJ/ha*)	%
Culture	1,063 kg graine	2,167	2,302	81,4%
Stockage Séchage	1,063 kg graine	0,148	0,157	5,6%
Transport	1,063 kg graine	0,019	0,020	0,7%
Presse	1,063 kg graine	0,323	0,343	12,1%
Filtre 1	1 kg huile	0,003	0,003	0,1%
Filtre 2	1 kg huile	0,003	0,003	0,1%
Total ENR	*MJ/kg huile*		*2,828*	*100%*
Rendement énergétique			**13,33**	

Tableau 32 : Consommations énergétiques de la production d'HVP à partir du tournesol de la Drôme.
(ECOBILAN, PRICEWATERHOUSECOOPERS, 2002)

✯ *HVP de tournesol*

Pour l'HVP de tournesol, nous partons d'un rendement d'huile de 34,5 %. En considérant l'huile à 100 % MS, le rapport d'allocation massique est de 37 %.

♣ Le département de l'Ain

Le bilan énergétique est dans cette hypothèse de 10,90 MJ d'énergie restitués par MJ d'énergie non renouvelable mobilisée pour la production d'un kilogramme d'HVP de tournesol (*Tableau 31*).

La consommation d'énergie non renouvelable vient principalement des ressources utilisées par la culture (85 %).

♣ Le département de la Drôme

Le bilan énergétique est dans cette hypothèse de 13,33 MJ d'énergie restitués par MJ d'énergie non renouvelable mobilisée pour la production d'un kilogramme d'HVP de tournesol (*Tableau 32*).

La consommation d'énergie non renouvelable vient principalement des ressources utilisées par la culture (81 %).

Nous pouvons conclure que **la trituration à froid pour l'obtention d'HVP révèle un bien meilleur rendement énergétique que l'EMHV**. En effet, le process de fabrication industrielle d'EMHV le pénalise fortement, alors que pour l'HVP la principale source d'énergie non renouvelable provient des consommations d'énergie imputées à la culture de l'oléagineux.

On remarque aussi que ce soit pour l'EMHV ou l'HVP, la production des graines de colza, par rapport aux graines de tournesol, est plus coûteuse en énergie, ce qui explique que le bilan énergétique est toujours supérieur pour les biocarburants à base de tournesol.

Enfin, il est important de préciser que les bons ratios énergétiques restent soumis à des niveaux de productivité corrects obtenus dans le cadre de conduites raisonnées.

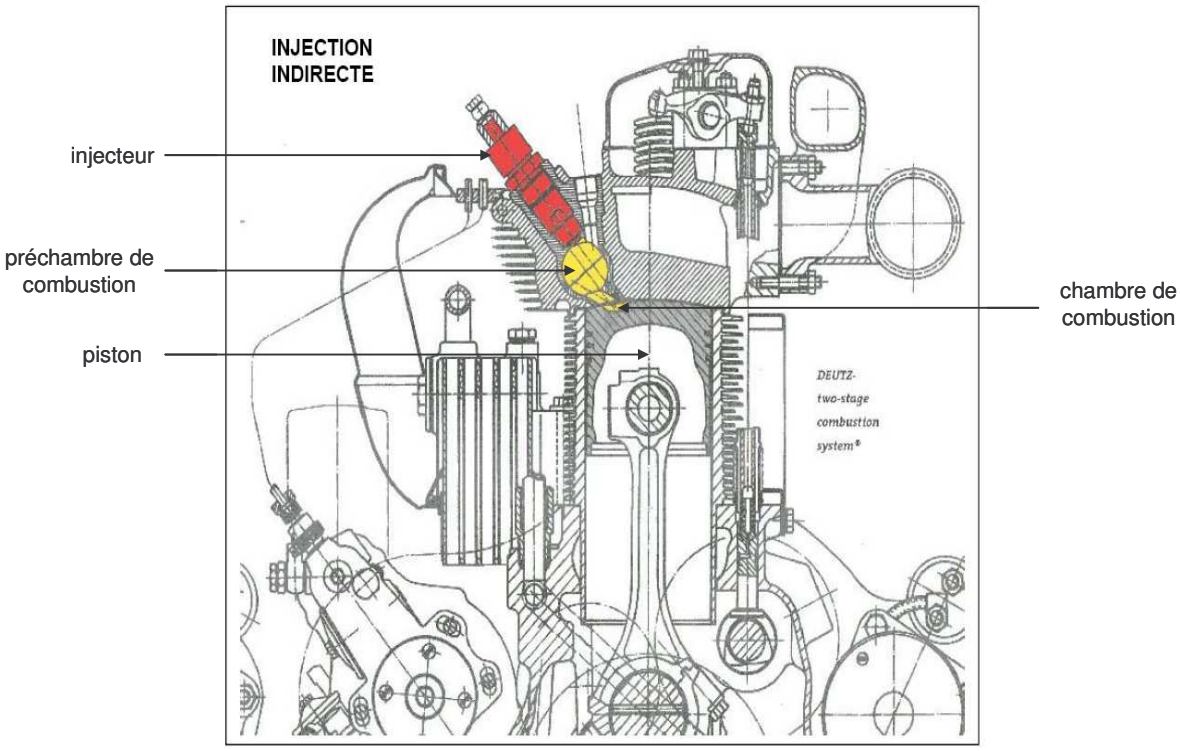


Figure 17 : Coupe d'un cylindre de moteur à injection indirecte. ***(CLEMENT T. et al., 2003)***

3 L'UTILISATIONS DES PRODUITS

3.1 L'Huile Végétale Pure

3.1.1 Les modifications des moteurs

Du fait de ses différences aux niveaux physique et chimique avec le gazole (viscosité, acidité…), l'utilisation de l'HVP dans les moteurs Diesel nécessite des adaptations plus ou moins importantes. En effet, le principe du diesel réside dans l'auto-inflammation du carburant pulvérisé dans de l'air chauffé par la compression du cylindre. Cette explosion se produit lorsque le mélange atteint une température suffisante, appelée **point éclair**. Pour le fioul, cette température est de seulement 96°C, alors que le point éclair de l'huile de colza ou de tournesol est supérieur à 300°C. On comprend donc aisément pourquoi des modifications du moteur sont indispensables et plus ou moins lourdes selon le type de moteur.

D'après les essais menés par le CIRAD, la température de la chambre de combustion doit atteindre 500°C si on veut éviter tout risque d'imbrûlés et donc d'encrassement du moteur.

On distingue trois familles de moteurs Diesel, selon deux modes d'injection : directe et indirecte.

3.1.1.1 Les moteurs à injection indirecte

Ces moteurs équipent encore la plupart des véhicules automobiles et les très gros moteurs industriels (supérieurs au Mégawatt). Pour qu'ils fonctionnent correctement, le carburant et l'air doivent être correctement mélangés. L'injection indirecte constitue le moyen le plus simple de créer une turbulence qui assure un mélange intime de la dose de carburant avec l'air déjà fortement comprimé dans la chambre de combustion (*Figure 17*).

Ainsi, le carburant n'est pas directement injecté dans la chambre de combustion principale, mais est envoyé dans une petite **chambre de turbulence** en spirale où s'amorce en réalité la combustion à température élevée, de l'ordre de 500 à 600° C, et cela dès 10 % de puissance délivrée. Les huiles végétales brûlent donc complètement.

Ces moteurs sont obligatoirement équipés de bougies de préchauffage du carburant à l'intérieur de la préchambre de combustion. La pompe à injection est manuelle (ou avec un petit peu d'électronique pour les plus récentes), elle est chargée de distribuer le carburant successivement à chaque cylindre en ouvrant les injecteurs les uns après les autres par la pression du gazole (aux environs de 130 bars).

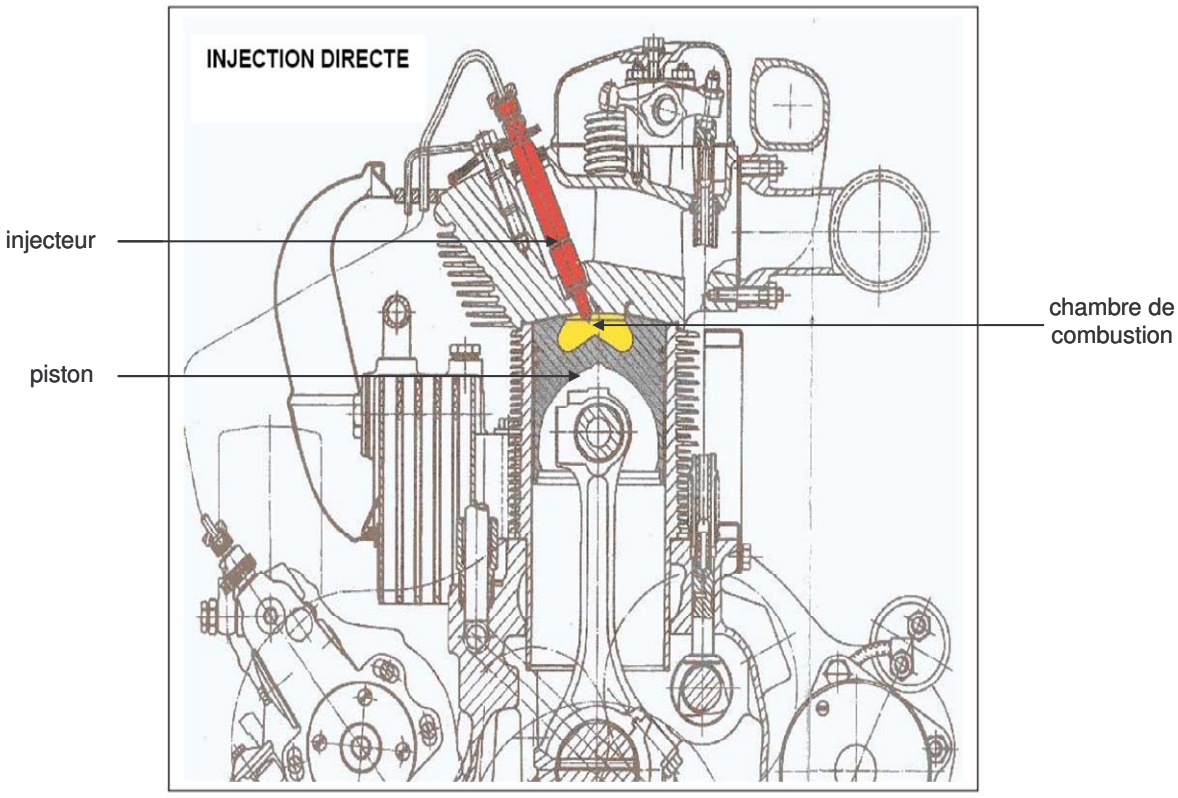


Figure 18 : Coupe d'un cylindre de moteur à injection directe. ***(CLEMENT T. et al., 2003)***

Pour utiliser de l'huile végétale en carburation à 100 %, il est donc nécessaire d'injecter l'huile dans une chambre de précombustion chaude. Le démarrage du moteur sera donc réalisé au gazole, puis le basculement à l'huile se fera dès lors que la température de la préchambre atteindra 500°C. Cette mesure pourra être assez facilement estimée en fonction de la température des gaz d'échappement. Pendant le fonctionnement au gazole, l'huile sera réchauffée afin de diminuer sa viscosité et donc de faciliter sa filtration et son injection.

Avant l'arrêt du moteur, il faut absolument le réalimenter avec du gazole, sinon le démarrage suivant risque d'être difficile et dans tous les cas provoquerait un encrassement du moteur au départ. De plus, les pompes à injection rotatives (Lucas, CAV Rotodiesel et Stanadyne) sont plus fragiles que les pompes en ligne (Bosch) et supportent très mal l'huile végétale trop visqueuse. Son réchauffage préalable est donc fortement conseillé si on veut éviter tout risque de casse.

3.1.1.2 Les moteurs à injection directe

Un moteur à injection directe ne possède pas de chambre de turbulence. Le carburant est injecté directement dans la chambre de combustion, qui est dessinée spécialement dans la tête du piston pour créer une turbulence suffisante (*Figure 18*).

Ces moteurs équipent la plupart des tracteurs agricoles depuis 25 ans, les camions et les moteurs industriels (inférieurs au Mégawatt). Ils sont équipés d'une pompe à injection manuelle (avec des éléments électroniques et parfois même un calculateur). La pression d'injection est comprise entre 180 et 250 bars.

L'huile végétale pure ou même raffinée n'est pas utilisable en l'état dans ces moteurs Diesel. En effet, lorsqu'ils délivrent jusqu'à la moitié de leur puissance nominale, la température moyenne des chambres de combustion est inférieure à 200°C, ce qui signifie qu'une part de gouttelettes d'huile ne va pas se vaporiser mais va se « coller » aux parois, provoquant des dépôts goudronneux. Ces dépôts vont vite s'accumuler sur le nez des injecteurs, perturbant ainsi la pulvérisation et dégradant leur fonctionnement. Ils vont également se loger dans la gorge du premier segment lui interdisant son élasticité, ce qui mène à des grippages et/ou une usure rapide de celui-ci. Il y a perte de compression, difficultés de démarrage à froid et détérioration du rendement (augmentation anormale de la consommation). Si alors la dilution d'huile végétale dans l'huile lubrifiante dépasse 1 %, l'huile de graissage peut rapidement se polymériser, provoquant le grippage total du moteur.

L'utilisation d'huile végétale carburant à 100 % pour ces moteurs reste donc conditionnée par une température supérieure à 500°C dans la chambre de combustion. Or, selon le CIRAD, cette température n'est atteinte que lorsque le moteur délivre au moins 70 % de sa puissance nominale environ. L'adaptation du moteur sera donc plus élaborée que pour un moteur à injection indirecte, le choix du carburant devant en permanence être décidé en fonction de la température de la chambre de combustion. Ainsi, le démarrage et l'arrêt du moteur se feront toujours au gazole, et le basculement à l'huile n'interviendra que lorsque la puissance demandée au moteur sera suffisamment importante pour obtenir une température élevée (>500°C) dans la chambre de combustion.

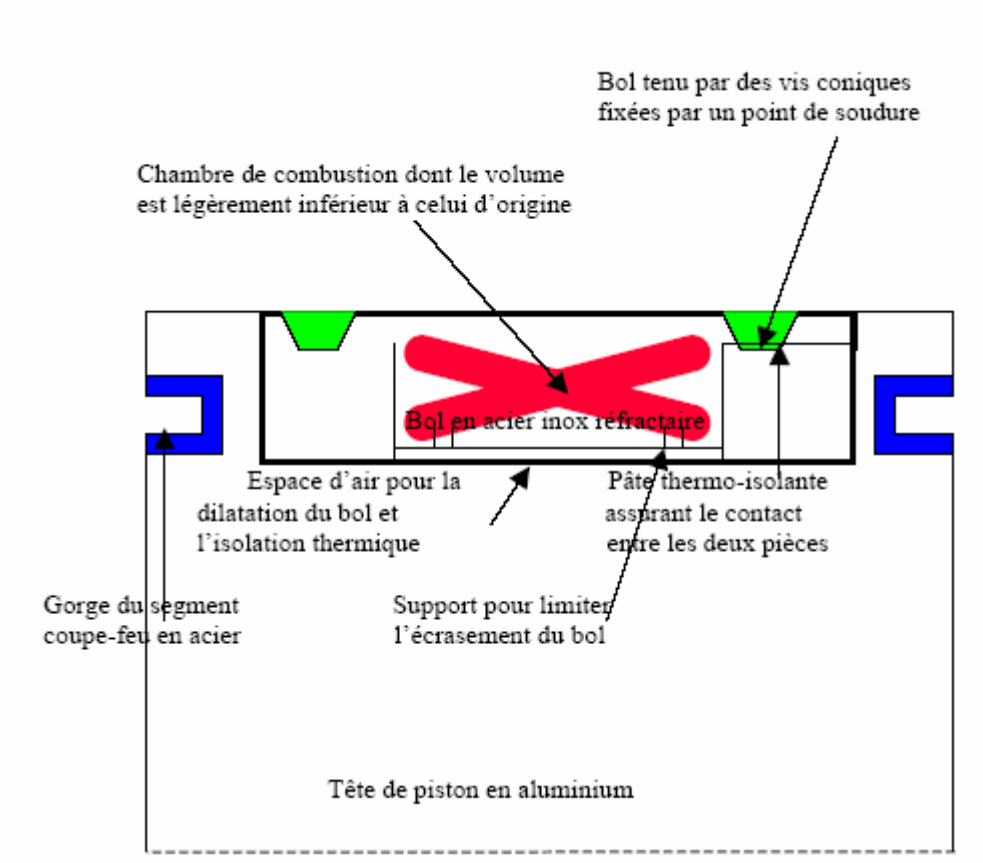

Bol tenu par des vis coniques
fixées par un point de soudure
Chambre de combustion dont le volume
est légèrement inférieur à celui d'origine
Bol en acier inox réfractaire
Espace d'air pour la
dilatation du bol et
l'isolation thermique
Pâte thermo-isolante
assurant le contact
entre les deux pièces
Gorge du segment
coupe-feu en acier
Support pour limiter
l'écrasement du bol
Tête de piston en aluminium

Figure 19 : Coupe d'un piston transformé. ***(CLEMENT T. et al., 2003)***

Dans les années 90, le CIRAD, en partenariat avec la FRCUMA Midi-Pyrénées et l'Association Régionale de Mécanisation Raisonnée de l'Agriculture (ARM), a suivi une expérimentation sur le fonctionnement de tracteurs et d'un groupe électrogène à l'huile de tournesol. Des modifications de la chambre de combustion ont été réalisées afin que les conditions de température lors du fonctionnement assurent une combustion complète de l'huile. Ces modifications devaient prendre en compte la conception et l'architecture interne du moteur tout en respectant les matériaux et les jeux fonctionnels mécaniques. Celles-ci ont permis d'obtenir une température de 500°C dès 25 % de puissance délivrée, et ainsi d'augmenter la plage d'utilisation de l'huile carburant sur un moteur à injection directe.

Les pistons ont été modifiés pour recevoir une chambre de forme spéciale en acier réfractaire afin de conserver un maximum de chaleur (*Figure 19*). Cette adaptation reste à l'état d'expérimentation, et coûte bien évidemment très cher tant que les constructeurs ne s'impliquent pas directement, en produisant eux-mêmes les modifications des moteurs.

Un double circuit d'alimentation du moteur en carburant a aussi été installé, composé d'un circuit fioul actif de 0 à 25 % de la puissance maximale du moteur, un circuit huile de tournesol actif de 25 à 100 % de la puissance maximale et un automatisme de bascule de l'un à l'autre (*Figure 20*). Chaque circuit de carburant est autonome, il comporte son réservoir, ses tuyauteries, ses filtres et sa pompe de gavage. Une électrovanne pilotée par l'automatisme permet d'alimenter la pompe à injection du moteur en fioul ou en huile de tournesol selon la charge demandée au moteur.

Dans tous les cas, les démarrages, les ralentis ainsi que les travaux demandant peu de puissance se font au fioul. Et dès que les travaux demandent au moins le quart de la puissance maximale, le moteur bascule à l'huile de tournesol.

3.1.1.3 Les moteurs à injection directe haute pression

Ce système dit « à **rampe commune** » se caractérise par une pompe haute pression qui alimente en permanence un tube (rampe) commun relié à chaque injecteur. Cette rampe fait office d'accumulateur de carburant, mais cette fois-ci l'ouverture des injecteurs est déclenchée électroniquement par le calculateur au moment opportun.

La pression d'injection atteint 1300 à 2000 bars, ce qui permet une pulvérisation très fine du carburant et donc sa meilleure combustion.

Remarque : Volkswagen équipe ses moteurs TDI d'un système d'injection haute pression appelé « injecteur pompe ». La pompe haute pression a été supprimée, ce sont donc les injecteurs comme leur nom l'indique, qui permettent la mise sous pression du carburant et son injection dans le cylindre.

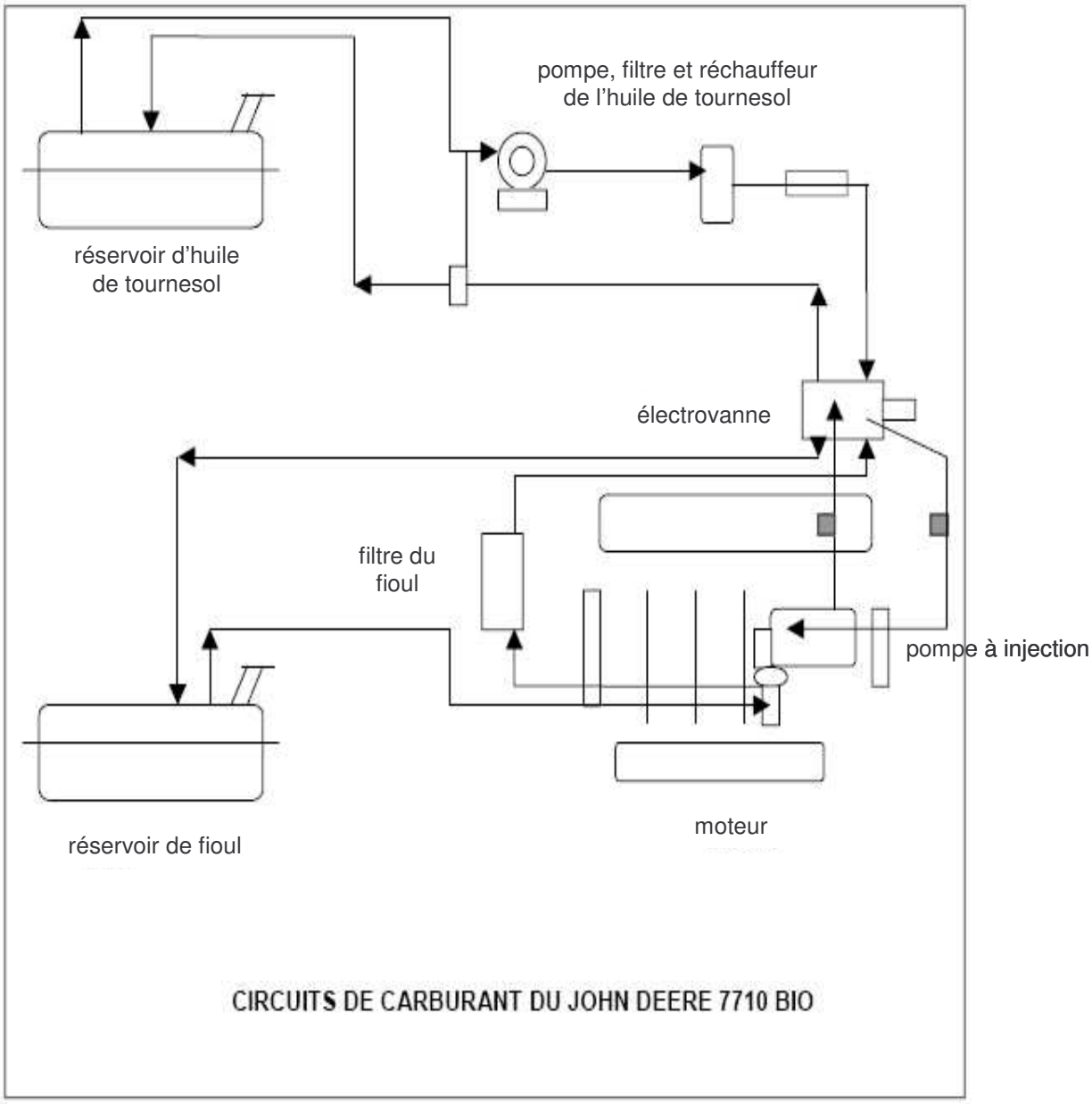


Figure 20 : Circuits de carburant du tracteur modfifié en bicarburation. ***(CLEMENT T. et al., 2003)***

En Allemagne, plusieurs sociétés privées proposent des modifications pour tous les moteurs Diesel permettant l'utilisation d'huile végétale carburant. C'est le cas de la firme VWP[40] qui travaille sur les moteurs dernière génération Volkswagen (présents aussi chez Audi, Seat et Skoda). Après plusieurs années de recherche, des brevets ont été déposés et permettent aujourd'hui à VWP de proposer à ses clients des voitures adaptées à l'HVP, avec les mêmes conditions de garantie qu'un modèle classique. L'adaptation concerne le circuit de carburant, les injecteurs, les paramètres électroniques et parfois les pistons ; il ne s'agit pas d'une bicarburation mais d'une utilisation pure d'HVP. L'utilisation de gazole reste possible mais provisoirement car le moteur n'est plus optimisé pour ce carburant fossile.

VWP cherche aujourd'hui des partenaires pour se développer. Une concession Audi en Allemagne propose des véhicules neufs déjà modifiés par VWP, pour un supplément de 3 à 4000 €. Un autre partenariat existe déjà entre une concession de tracteurs agricoles Deutz-Fahr et VWP ; le client peut choisir d'acheter son tracteur neuf adapté à l'HVP pour un coût supplémentaire de 5 à 6000 €. *(GUIRAL E., SAINT-CYR C., 2005)*

La société allemande ELSBETT développe depuis une vingtaine d'années des kits d'adaptation et des moteurs spécifiquement adaptés aux huiles végétales. L'« elsbettisation » consiste à adapter les moteurs à injection indirecte ainsi que les moteurs à injection directe ancienne génération. Cette transformation est assurée par l'entreprise elle-même ou pas l'une des 60 entreprises agrées en Allemagne. Des expérimentations sont actuellement menées sur les véhicules common rail.

D'autre part, le moteur EL-KO, créé en 1987, permet de brûler les huiles végétales avec un rendement de 45 % (contre 38 % pour les véhicules Diesel et 26 % pour les essence). Ce moteur à injection directe se caractérise par moins de déperdition de chaleur grâce à une conception originale du piston, pas de refroidissement, une vitesse plus rapide (4 000 trs/mn), la suppression du joint de culasse, des injecteurs à tétons… *(IFHVP, 2004)*

En avril 2001 a été lancée en Allemagne l'opération « 100 tracteurs à l'HVP ». Ce projet d'expérimentation à grande échelle, financé par l'Administration allemande, a réuni dix types de moteurs et cinq sociétés développant des adaptations à ce carburant végétal. Aucune bicarburation n'était demandée, le démarrage à froid devait se faire obligatoirement à l'huile. VWP a évidemment participé à ce programme, en modifiant 56 tracteurs (essentiellement des Deutz-Fahr) sur 109.

La consommation totale d'HVP pour ces tracteurs a été de 1,1 million de litres, avec des utilisations très variables de 600 à 2000 heures par an. Au final, 80 % des tracteurs fonctionnent toujours tandis que les 20 % restants ont connu une casse de leur moteur due à une mauvaise adaptation ne respectant pas certaines règles. La principale cause des problèmes rencontrés a été le bouchage des injecteurs, généralement observé après 500 heures de fonctionnement.

En France, aucun constructeur ou société ne propose des véhicules adaptés à l'HVP. De plus, la généralisation des filtres à particules sur les moteurs common rail pose problème car l'huile végétale produit des particules 100 à 1000 fois plus grosses que le gazole, particules qui sont aussi bien moins cancérigènes que celles du gazole.

[40] VWP : Vereinigte Werkstätten für Pflanzenöltechnologie.

3.1.2 Performances globales comparées des moteurs carburant à l'Huile Végétale Pure et au fioul

3.1.2.1 Les véhicules légers

(JOYE P., 2003)

Dans le cadre du projet TriCoF (Belgique), des essais ont été menés sur un moteur Volkswagen 1,2 L TDI 3 cylindres mis au banc dynamique, qui permet de reproduire des conditions précises de fonctionnement : vitesse de rotation, charge du moteur. Ce moteur a été préalablement modifié pour permettre une utilisation d'HVP à 100 %, avec le rajout d'un filtre à carburant chauffant ainsi qu'un système de chauffage du moteur avant démarrage.

Les essais ont consisté à mesurer, pour des couples vitesse de rotation – charge, les paramètres suivants :

- **couple moteur** ;
- **puissance moteur** ;
- **consommation spécifique**.

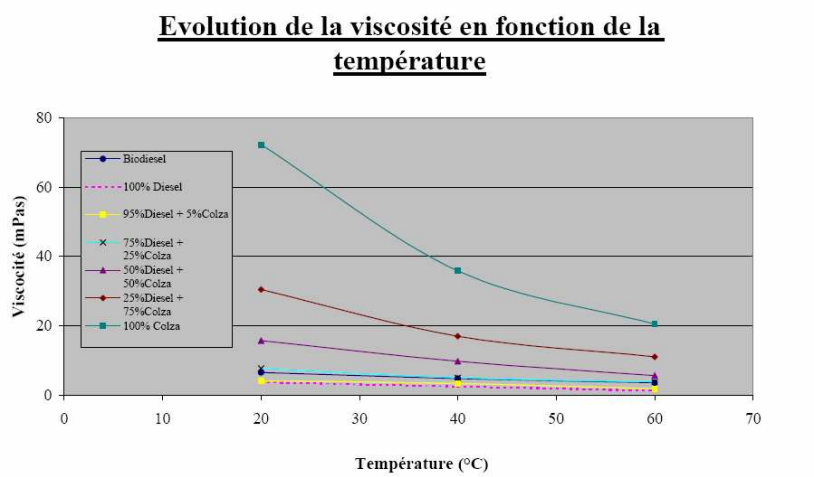
Des mesures ont été réalisées :

- pour les combinaisons [vitesse – charge moteur] suivantes :
  - vitesse de rotation moteur variant de 2000 à 4400 trs/mn avec un pas de 200 trs/mn ;
  - charge du moteur à 50, 75 et 100 % ;

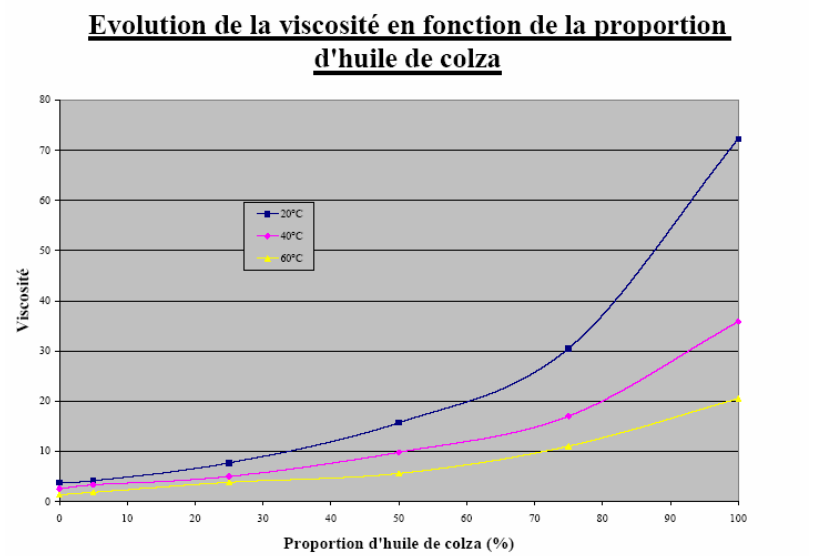
- et pour les différents carburants suivants :
  - carburant de référence : gazole disponible sur le marché de distribution répondant à la norme de 50 ppm de soufre ;
  - différentes combinaisons de mélange gazole – huile de colza :
    - 5 % huile de colza – 95 % gazole ;
    - 25 % huile de colza – 75 % gazole ;
    - 50 % huile de colza – 50 % gazole ;
    - 75 % huile de colza – 25 % gazole.
  - huile de colza pure ;
  - ester méthylique d'huile de colza.

Ces essais visant d'une part à reproduire les conditions normales d'utilisation d'un véhicule, et les modifications apportées aux véhicules ayant pour but d'autre part de réchauffer l'huile carburant, le carburant contenant une proportion d'huile supérieur à 50 % est réchauffé à une température de ± 70°C avant injection.

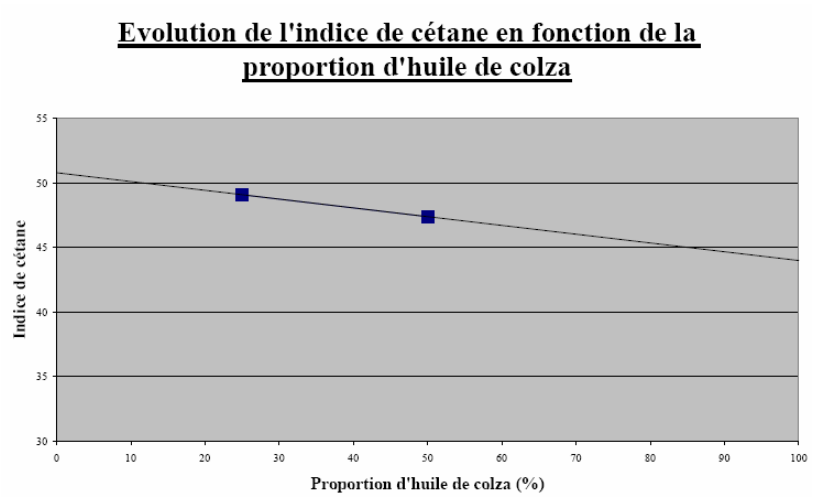
Des analyses de laboratoire ont été réalisées sur ces différents carburants en ce qui concerne les caractéristiques de viscosité et d'auto inflammabilité (indice de cétane). Les résultats de ces analyses sont les suivants.



Graphique 9 : Évolution de la viscosité des carburants en fonction de la température. ***(JOYE P., 2003)***



Graphique 10 : Évolution de la viscosité des carburants en fonction de la proportion d'huile de colza et de la température. ***(JOYE P., 2003)***


Evolution de l'indice de cétane en fonction de la proportion d'huile de colza
Indice de cétane
Proportion d'huile de colza (%)

Graphique 11 : Évolution de l'indice de cétane du carburant en fonction de la proportion d'huile de colza. ***(JOYE P., 2003)***

✯ *Viscosité*

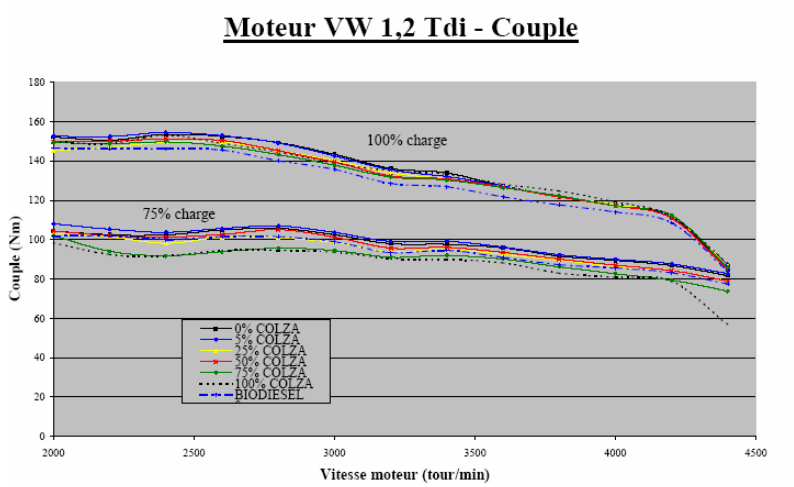
Concernant la viscosité, on observe une gradation logique entre les différents carburants en fonction de la proportion d'huile de colza qu'ils contiennent (0<5<25<50<75<100 %). Le biodiesel présente, quant à lui, une courbe de viscosité proche de celle obtenue pour le mélange 75 % de colza – 25 % gazole, mélange qui présente lui-même des valeurs peu supérieures à celles observées pour le gazole pur et qui sont inférieures à 10 (*Graphique 9*).

La viscosité d'un carburant, pour une température donnée, n'est pas une fonction linéaire de la proportion d'huile de colza qu'il contient. Ainsi, à 20°C, la viscosité du mélange 50 % huile de colza – 50 % gazole (15,7) ne correspond pas à la moitié de la viscosité de l'huile pure (72,3) (*Graphique 10*).

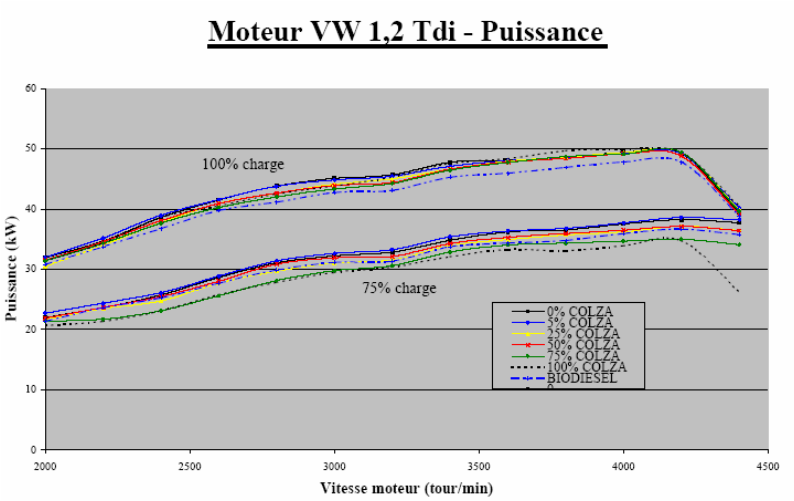
✯ *Indice de cétane*

Pour l'indice de cétane, en fonction des résultats disponibles obtenus avec la méthode classique (mélanges à 25 % et 50 % d'huile de colza), on arrive à des valeurs répondant aux normes réglementaires (>49) pour le mélange contenant 25 % d'huile de colza. Pour l'huile de colza pure, on obtient par interpolation et en faisant l'hypothèse d'une relation linéaire entre cet indice de cétane et la teneur en huile de colza, une valeur de 44, ce qui est largement supérieur à la valeur déterminée par la méthode classique (36), méthode inadaptée pour un tel produit ().

Les essais concernant les tests de puissance, de couple et de consommation spécifique sont présentés ci-après.



Graphique 12 : Couple du moteur de voiture en fonction de la charge et de la proportion d'huile de colza dans le carburant. ***(JOYE P., 2003)***



Graphique 13 : Puissance du moteur de voiture en fonction de la charge et de la proportion d'huile de colza dans le carburant. ***(JOYE P., 2003)***

✯ *Couple*

Au niveau du couple, on observe peu de différence entre les différents carburants testés à 100 % de charge, avec cependant une différence plus marquée pour le biodiesel. À 75 % de charge, les différences sont un peu plus nettes, avec une gradation en faveur des carburants pauvres en huile de colza (*Graphique 12*).

Les différences restent cependant dans des limites acceptables :

- à 3000 trs/mn et 100 % de charge, le couple varie de 136 Nm pour le biodiesel à 143 Nm pour l'essai à 100 % gazole, soit une différence de 5 % (différence non détectable par le commun des automobilistes) ;
- à 3000 trs/mn et 75 % de charge, le couple varie entre 93,5 (100 % colza) et 103,5 Nm (5 % colza), soit une différence de 10 %.

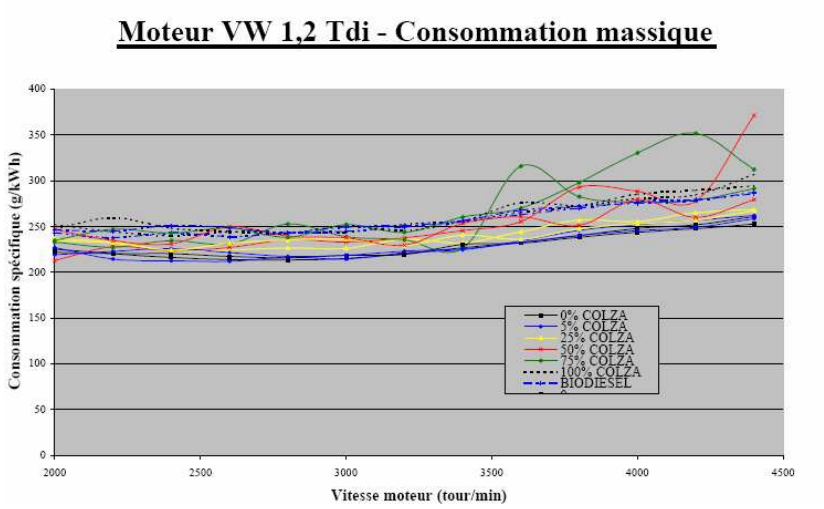
Ces différences peuvent être expliquées par la nature du carburant, mais également par le comportement du moteur dont la gestion électronique prend en compte toute une série de paramètres sur lesquels il est difficile d'agir (température de l'air, température de l'eau…) et qui peuvent conduire, pour des vitesses et charges données, à des résultats différents de couple, puissance et consommation via des pressions de turbo différentes, des durées d'injection variables et in fine d'un coefficient lambda (rapport air/carburant) également fort variable (variant par exemple de 2,09 à 2,36 pour une vitesse de 3000 trs/mn avec une charge de 75 %).

✯ *Puissance*

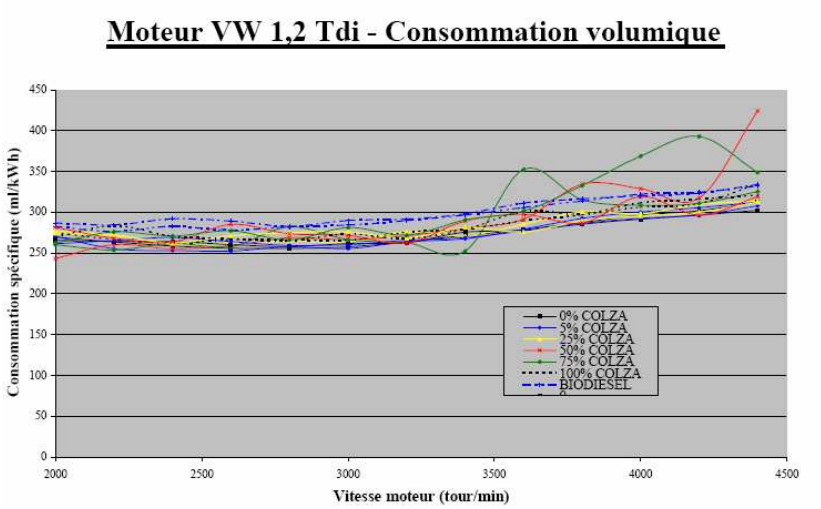
Les résultats concernant la puissance développée par le moteur sont similaires aux résultats obtenus par le couple (*Graphique 13*) :

- à 100 % de charge, peu de différences entres les différents carburants : à 3000 trs/mn, 43,5 kW pour le biodiesel contre 45 kW pour le gazole pur, soit une différence de 3,5 % ;
- à 75 % de charge, différence légèrement plus marquée en faveur des carburants pauvres en huile de colza : à 3000 trs/mn, 29,5 kW pour l'huile de colza pure contre 32,5 kW pour le mélange contenant 95 % de gazole, soit une différence proche des 10 %.

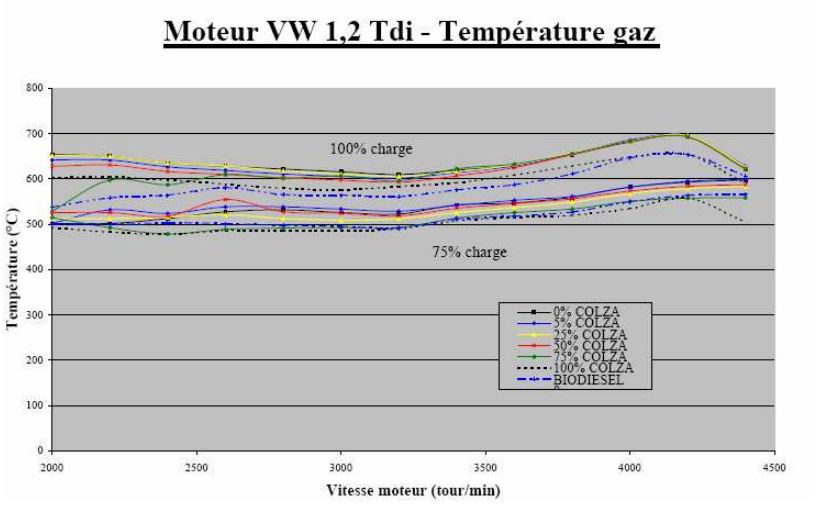
Les mêmes explications que précédemment peuvent être avancées pour justifier ces écarts (nature du carburant, gestion électronique…).



Graphique 14 : Consommation spécifique massique du moteur de voiture en fonction de la proportion d'huile de colza dans le carburant. ***(JOYE P., 2003)***



Graphique 15 : Consommation spécifique volumique du moteur de voiture en fonction de la proportion d'huile de colza dans le carburant. ***(JOYE P., 2003)***



Graphique 16 : Température des gaz d'échappement en fonction de la proportion d'huile de colza dans le carburant. ***(JOYE P., 2003)***

✯ *Consommation spécifique*

La consommation spécifique est la consommation de carburant nécessaire à la production d'une unité d'énergie, en l'occurrence le kWh. Elle est normalement exprimée en g/kWh mais, étant donné la différence importante de densité entre les différents carburants testés, il peut être opportun de l'exprimer également en unité de volume (ml/kWh).

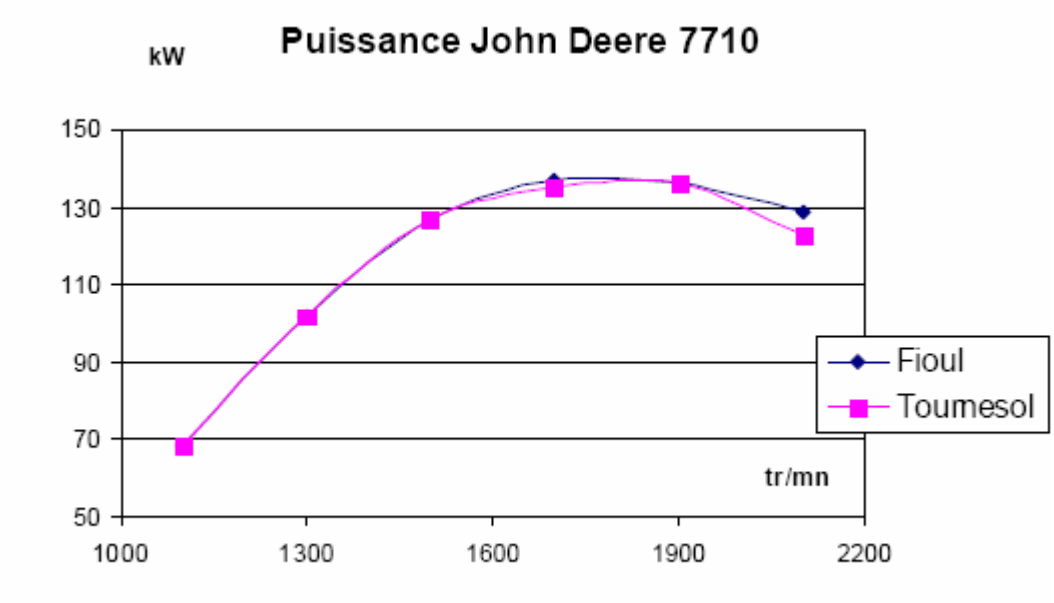
En faisant abstraction de quelques données qui peuvent être considérées comme incohérentes, on peut observer une gradation entre les différents carburants avec, pour les carburants contenant peu d'huile de colza, des valeurs inférieures à celles rencontrées pour les carburants riches en HVP (*Graphique 14*).

Une fois ces consommations spécifiques ramenées en volume, ces différences s'estompent fortement : à 3200 trs/mn, la consommation spécifique, exprimée en ml/kWh, varie de 262,26 (50 % de colza à 75 % de charge) à 275,77 (25 % de colza à 100 % de charge), soit une variation de moins de 5 % (*Graphique 15*).

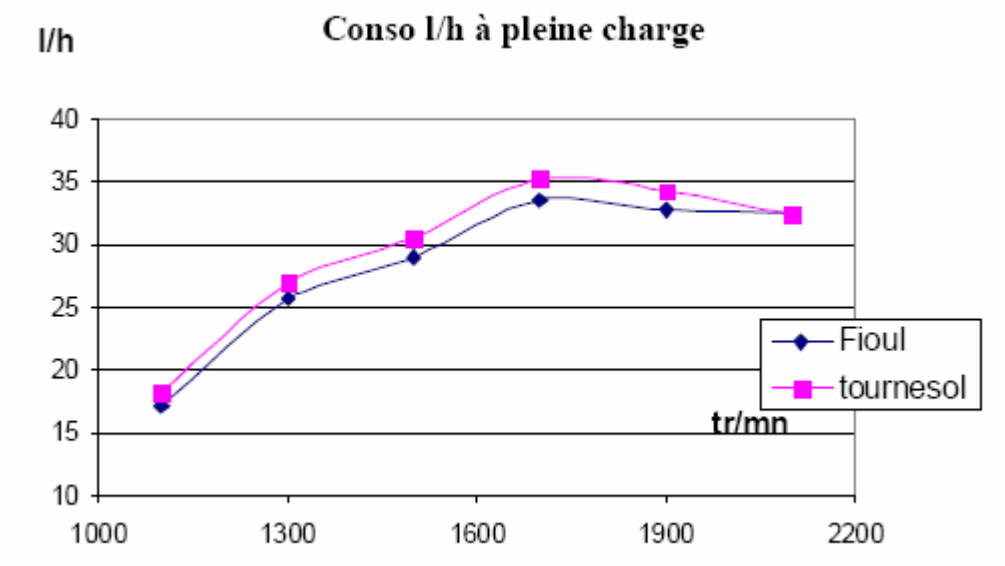
Seules les courbes du biodiesel se distinguent des autres et sont légèrement supérieures (290 ml/kWh à 3200 trs/mn). La faible densité de ce carburant, associée à un PCI inférieur, explique ces résultats quelque peu supérieurs.

✯ *Température des gaz d'échappement*

Au niveau de la température des gaz mesurée dans le collecteur à la sortie du moteur, et qui est donc représentative de la température rencontrée dans les cylindres, on peut remarquer une baisse de celle-ci avec l'augmentation de la teneur en HVP, ce qui conduit à une baisse des contraintes thermiques subies par le moteur (*Graphique 16*).



Graphique 17 : Puissance du moteur de tracteur en fonction du carburant. ***(CLEMENT T. et al., 2003)***



Graphique 18 : Consommation du moteur de tracteur à pleine charge en fonction du carburant. ***(CLEMENT T. et al., 2003)***

3.1.2.2 Les tracteurs

(CLEMENT T. et al., 2003)

L'expérimentation suivie par le CIRAD en Midi-Pyrénées montre des résultats de puissances maximales obtenues avec l'huile de tournesol très proches de celles du fioul (*Graphique 17*). En revanche, la consommation volumique à pleine charge est légèrement supérieure avec l'huile (+ 5 à 8 %) (*Graphique 18*). Cette surconsommation s'explique par une quantité de carburant admis plus importante avec l'huile de tournesol. Mais au final, le rendement global est amélioré par rapport au fioul, ce qui est très encourageant pour ce type de carburant (*Graphique 19*).

Les graphiques ci-contre montrent les résultats obtenus sur un des tracteurs de l'expérimentation, un John Deere 7710.

Le rendement du moteur est calculé par le rapport entre l'énergie fournie et l'énergie consommée :

$$\text{Rendement} = \frac{\text{puissance fournie (W)}}{\text{densité carburant x PCI carburant (J) x consommation (L/h) / 3600}}$$

On peut prendre l'exemple suivant, à 1900 trs/mn :

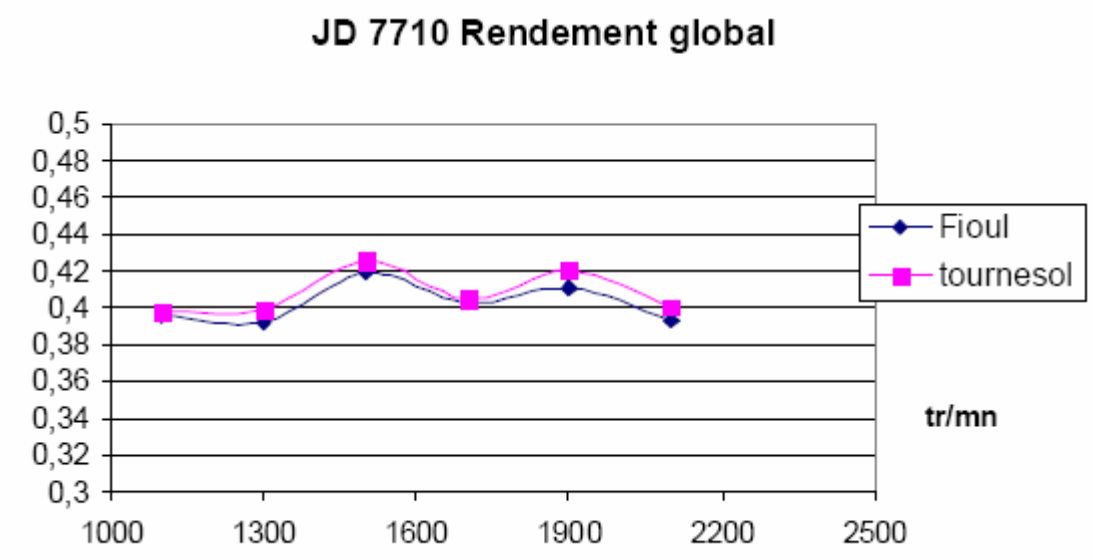
$$\text{Rendement} = \frac{139000}{0{,}925 \times 37{,}3.10^{6} \times 34 / 3600} = 0{,}427.$$

3.1.3 Les émissions de polluants

3.1.3.1 Les normes européennes d'émission de polluants

Des directives Européennes décrivent les normes d'émission de gaz d'échappement des différents véhicules motorisés. Les motoristes doivent alors garantir leurs moteurs au respect de ces normes pour leur homologation. En France, l'organisme chargé de ces homologations est l'UTAC (Union Technique de l'Automobile, du Cycle et du motocycle).

Ces normes sont détaillées pour chaque type de véhicule en annexe *3. Les normes européennes d'émission de polluants*.



Graphique 19 : Rendement du moteur de tracteur en fonction du carburant. ***(CLEMENT T. et al., 2003)***

Tracteurs	TM150 fioul	TM150 tournesol	JD 7710 fioul	JD 7710 tournesol	NH LM430C fioul	NH LM430C tournesol
N tr/mn	2200	2201	2100	2100	2200	2200
Puiss. kW	94.6	77.2	129.1	123.8	77.4	76.9
Puiss ch	128.5	104.8	175.4	168.4	105	104.5
Conso carb l/h	29.4	nc[41]	32.8	32.04	21.6	23.3
Temp air admis	21	26	20	22	18	18
Temp échap °C	344	367	523	520	477	464
CO ppm	135	115	120	172	220	160
CO2 %	5.9	5.6	6.7	6.4	7.5	6.9
HC ppm	32	56	42	82	95	44
O2 %	12.9	13.3	11.8	12.3	10.7	11.6
NOx ppm	1200	977	762	684	1130	765
Excès air	1.61	1.75	1.30	1.44	1.06	1.25

Tableau 33 : Mesure d'émissions de polluants sur tracteurs à puissance nominale au régime nominal. ***(CLEMENT T. et al., 2003)***

[41] nc : non communiqué.

3.1.3.2 Retours d'expériences de mesures d'émission de polluants

✯ *Les moteurs de tracteurs agricoles*

L'expérimentation réalisée en Midi-Pyrénées par le CIRAD et l'ARM sur 3 tracteurs modifiés (bicarburation, modification des pistons…) montre que les résultats des taux de polluants sont remarquables.

Les mesures d'émissions de polluants ont été réalisées sur 4 cycles définis du moteur :

- **1er cycle :** puissance nominale au régime nominal ;
- **2ème cycle :** puissance maximale au régime correspondant ;
- **3ème cycle :** couple maximum au régime correspondant ;
- **4ème cycle :** ralenti sans charge.

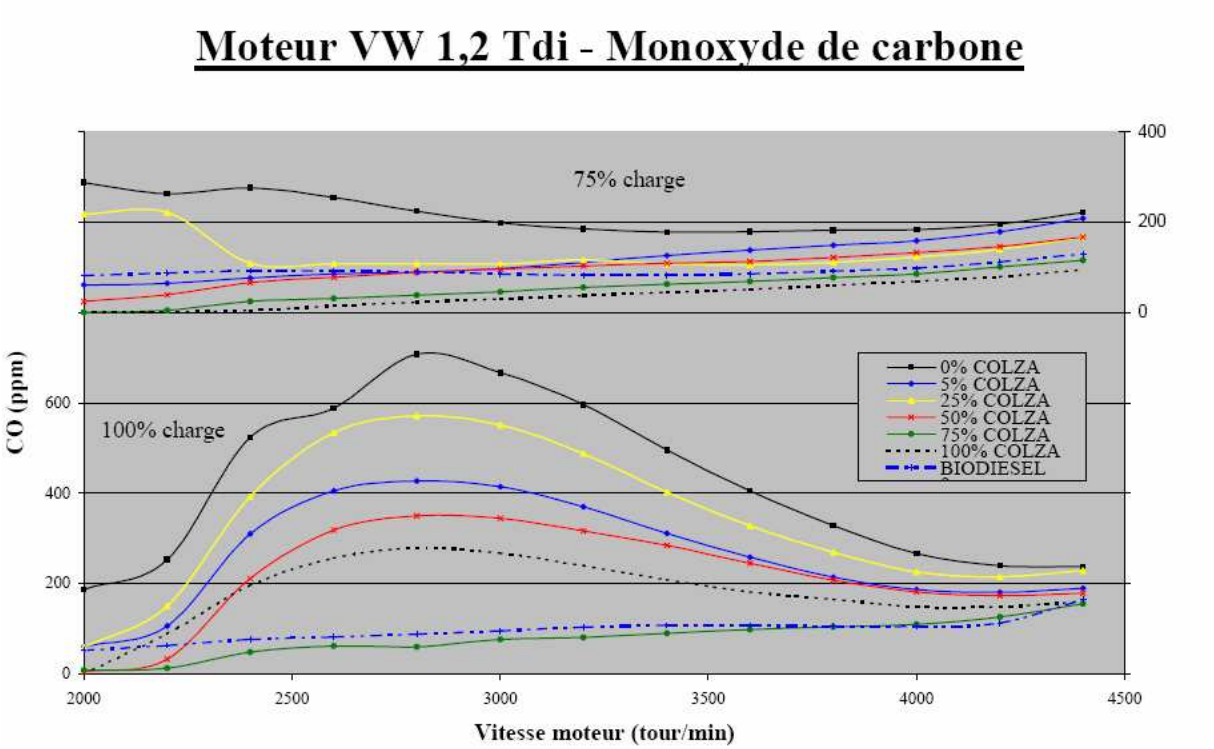
Ces mesures ont été réalisées en carburation au fioul avant modification des moteurs, puis en carburation à l'huile (tournesol dans ce cas) après modification (*Tableau 33*).

Les modifications moteurs réalisées devaient respecter la conception et l'architecture interne du moteur tout en respectant les matériaux et les jeux fonctionnels mécaniques. Une vérification de la réussite de ces opérations se fait par la mesure et la comparaison des niveaux d'imbrûlés dans les gaz d'échappement, ou plus globalement en comparant les taux de polluants entre fioul dans le moteur d'origine et huile de tournesol dans le moteur modifié.

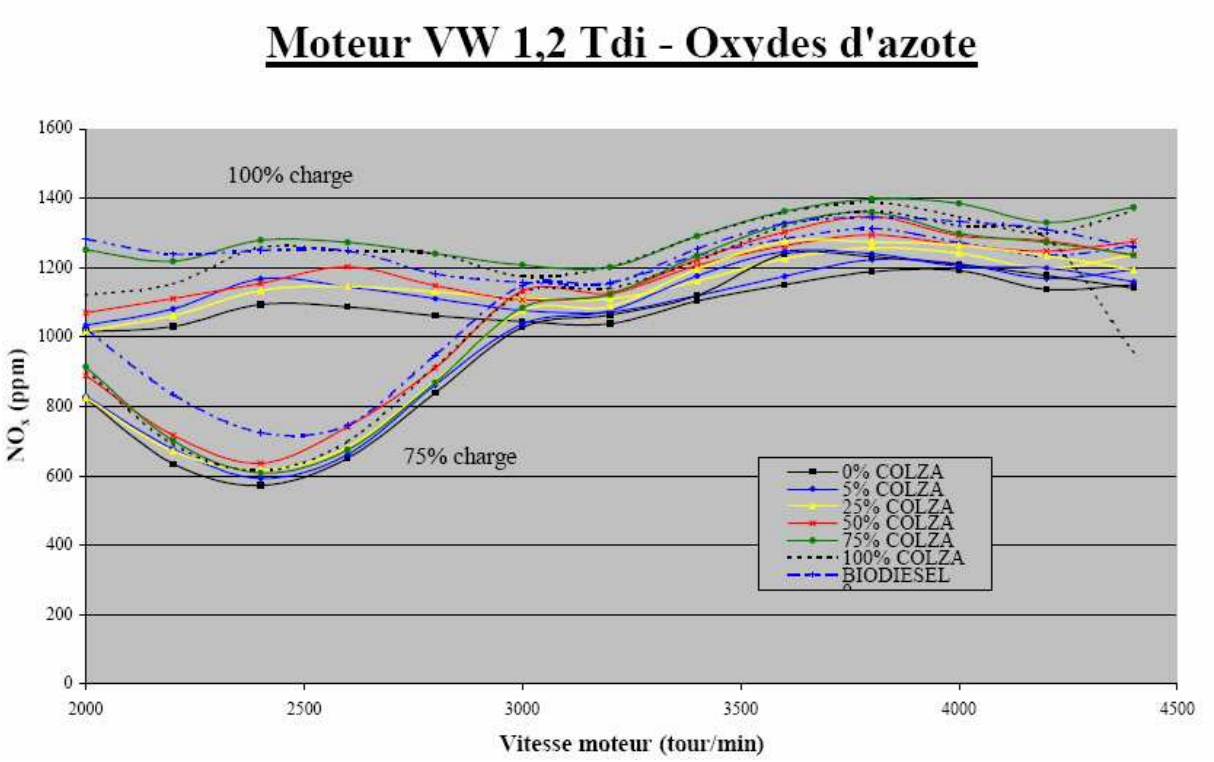
Les conclusions de cette expérimentation sont :

« *Avec l'huile de tournesol, les trois engins modifiés présentent des taux de CO, HC et NOx très proches de ceux mesurés sur les versions d'origine au fioul. Ce résultat est à remarquer, il ne peut qu'être encourageant pour un constructeur qui a les moyens d'optimiser encore les modifications de ses moteurs.*

Par ailleurs, les mesures réalisées indiquent des niveaux d'émission qui respecteraient les limites normatives d'homologation. Autrement dit, ces tracteurs à l'huile de tournesol « passeraient » les tests définis par les directives de l'ISO 8178 avec les facteurs de pondération du cycle C1 relatifs aux véhicules et équipements industriels non routiers moyennement ou fortement chargés. »



Graphique 20 : Émission de monoxyde de carbone d'un moteur de voiture en fonction de la charge. ***(JOYE P., 2003)***



Graphique 21 : Émission d'oxydes d'azote d'un moteur de voiture en fonction de la charge. ***(JOYE P., 2003)***

✯ *Les moteurs de véhicules légers*

L'expérience belge TriCoF a permis d'observer le comportement d'un moteur Diesel (moteur VW 1,2 Tdi) fonctionnant en mélange ou en totalité à l'HVP de colza. Les mesures d'émissions ont concerné les CO, NO_X, HC et particules (suies).

♣ Le monoxyde de carbone

Ce graphique montre que globalement, plus le taux de substitution du gazole par de l'HVP est important (jusqu'à l'utilisation pure à 100 %), meilleure est la courbe d'émission de CO. À noter aussi que l'essai réalisé avec du biodiesel pur montre que ce carburant produit moins de CO que le gazole (*Graphique 20*).

♣ Les oxydes d'azote

Au niveau des NO_X, on peut observer un creux dans les courbes d'émissions à bas régime pour une charge de 75 %. Cependant, ces mesures nous permettent de dire que l'augmentation de teneur en HVP dans le mélange s'accompagne d'une hausse des émissions de NO_X. Cet écart mesuré est de 15 % entre le gazole pur et l'HVP pure à 3000 trs/mn pour l'essai à 100 % de charge, et de 10 % pour l'essai à 75 % de charge (*Graphique 21*).

♣ Les hydrocarbures imbrûlés

Pour une charge de 75 %, la valeur maximale est obtenue par le mélange 5 % HVP / 95 % gazole. On constate que les courbes d'émissions de HC diminuent avec un pourcentage d'HVP croissant. Bien qu'utilisée pure, l'HVP possède une courbe d'émission dans la moyenne (*Graphique 22*).

À pleine puissance, les courbes sont inversées et on observe une baisse des HC corrélée avec la teneur en gazole du mélange. Le biodiesel se retrouve, pour les deux essais, avec de faibles valeurs d'émissions d'HC.

Pour ce critère on voit que les rejets d'émission dépendent plus des conditions de fonctionnement du moteur que du carburant utilisé.

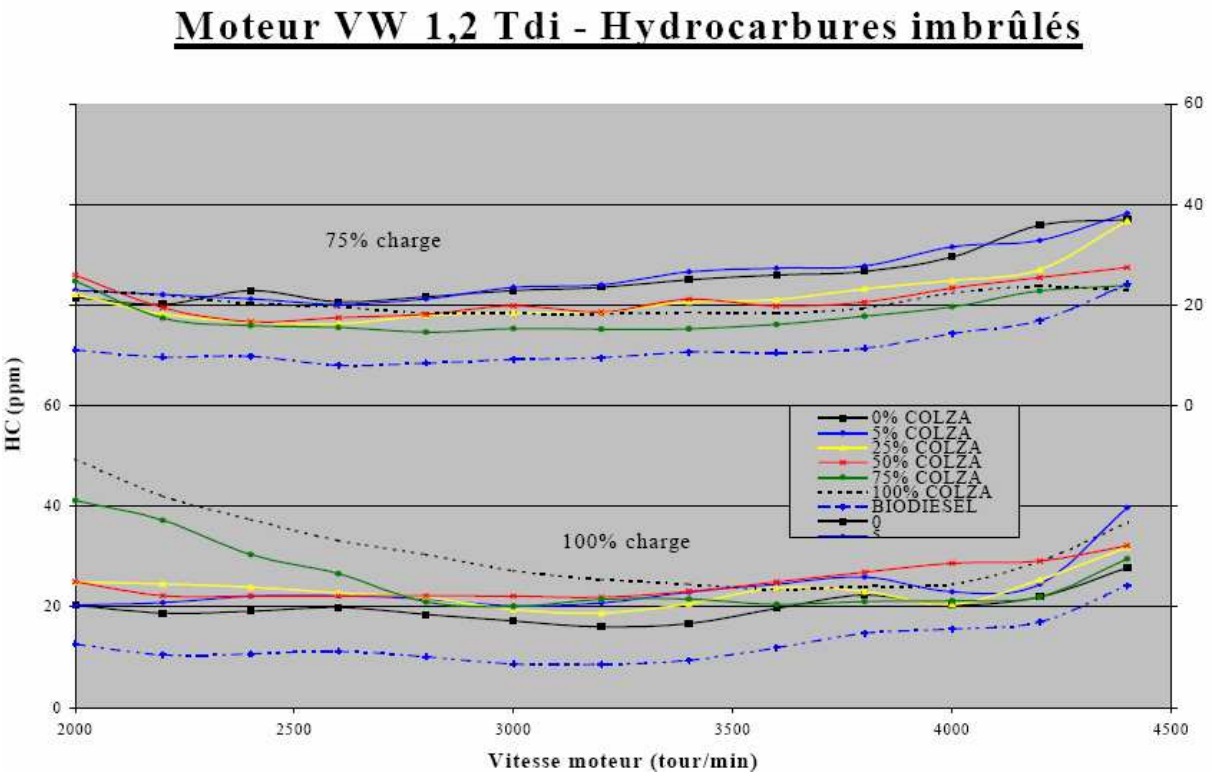
♣ Les particules

Ce graphique montre que l'augmentation du pourcentage d'HVP dans le mélange carburant entraîne une diminution des suies rejetées. Cette différence est importante entre l'HVP pure et le gazole, elle atteint 70 % d'émissions en moins pour l'HVP à 3000 trs/mn à 100 % de charge, et 80 % de moins à 75 % de charge. Le biodiesel permet une diminution similaire à l'huile pure (*Graphique 23*).

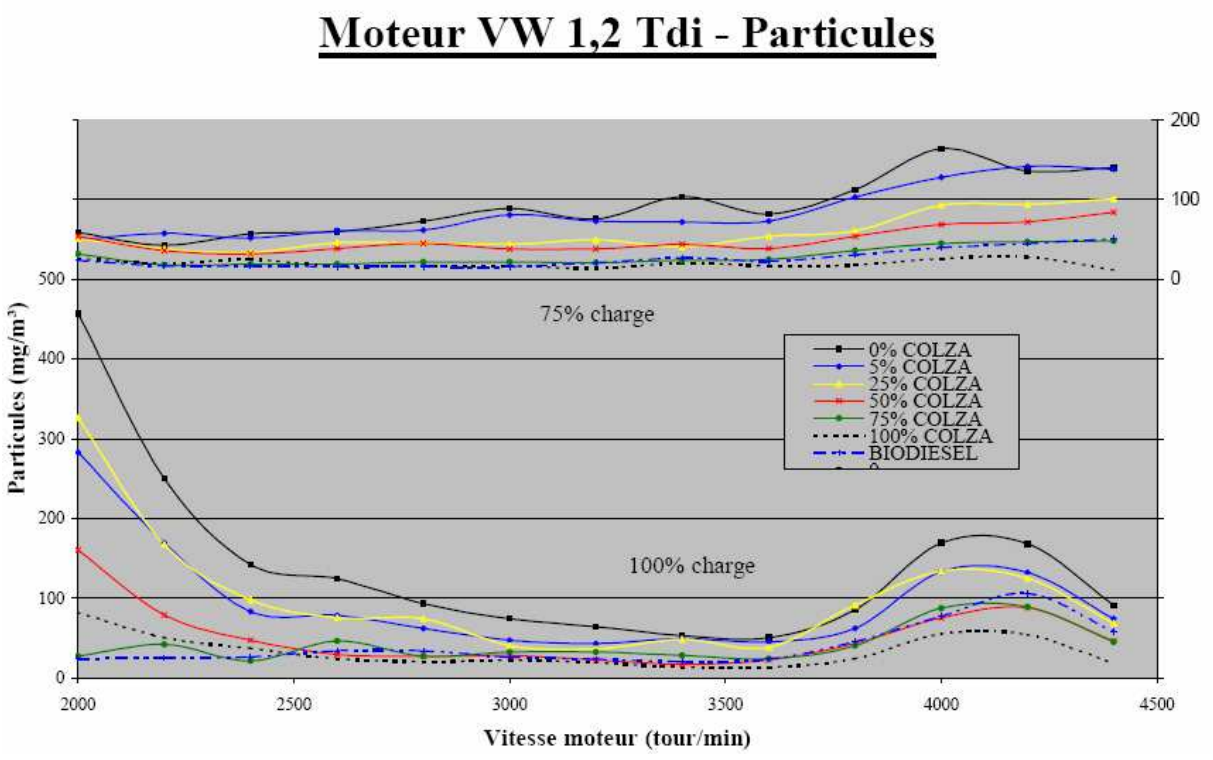
La synthèse des résultats d'émissions de polluants par l'HVP carburant permet de conclure à :

- une baisse de la teneur en CO,
- une hausse limitée de NO_X,
- une baisse importante de particules.

Les résultats du test HC ne permettent pas de faire ressortir une tendance.



Graphique 22 : Émission d'hydrocarbures imbrûlés d'un moteur de voiture en fonction de la charge. ***(JOYE P., 2003)***



Graphique 23 : Émission de particules d'un moteur de voiture en fonction de la charge. ***(JOYE P., 2003)***

3.1.4 L'huile combustible

Les chaudières au fioul utilisées en chauffage domestique ou professionnel (serres, élevages, séchoirs….) sont tout à fait capables, au même titre que les moteurs, de brûler l'HVP, à condition de réaliser tout de même certaines modifications, mais plus simples en poste fixe.

Un brûleur adapté, polycombustibles, est indispensable, accompagné d'un kit de pompage, chauffage (jusqu'à 140°C) et filtration. Le prix de la modification reste encore assez élevé, à partir de 2000 € chez Kroll par exemple. Mais d'autres constructeurs commencent à apparaître sur le marché, notamment Ar-Co.

L'utilisation de l'HVP en tant que combustible est techniquement et légalement possible, mais compte tenu des surfaces disponibles, il serait sûrement plus judicieux de réserver ce précieux produit pour l'utilisation carburant des véhicules. En effet, de nombreux autres procédés existent pour le chauffage, comme la biomasse notamment (bois, céréales…).

3.1.5 Autoconsommation d'Huile Végétale Pure

L'autoconsommation d'HVP comme carburant sur les exploitations, en remplacement du fioul, semble attractive pour les agriculteurs (augmentation du prix du baril, déplétion du pétrole, dépendance protéique, environnement…). Le futur projet de Loi d'Orientation Agricole (article 12) autorise à titre expérimental jusqu'au 31 décembre 2007 l'utilisation d'HVP carburant (sous condition que cet article soit validé par l'Assemblée Nationale et le Sénat). Cette filière HVP s'inscrit donc dans une volonté environnementaliste mais aussi économique et politique.

3.1.5.1 Besoins matériels

La mise en place d'un tel atelier au sein de l'exploitation nécessite quelques investissements matériels :

- un bâtiment, même si bien souvent il existe déjà ;
- une (des) presse(s) ;
- un ou des filtres suivant la technique utilisée pour la purification de l'huile ;
- des cuves ou réservoirs supplémentaires pour transférer l'huile et la stocker après production ;
- une (des) pompe(s) pour le transfert de l'huile entre cuves ou dans les réservoirs ;
- une cellule de stockage du grain ;
- un emplacement de stockage du tourteau ;
- une (des) adaptation(s) moteur(s)

Avant d'investir dans tout le matériel de production d'HVP, il est nécessaire de réfléchir au bâtiment qui va abriter cet atelier, afin de simplifier les manipulations et l'organisation du travail occasionné par la fabrication de l'huile. Par exemple, la manutention du tourteau peut s'avérer fastidieuse si le bâtiment n'est pas adapté et si le lieu de stockage de l'aliment est éloigné. Tout cet aspect organisation est primordial car la production d'huile (en respect d'une norme qui reste à définir) doit être un atelier de l'exploitation à part entière, confortable et productif.

3.1.5.2 Chaînes logistiques

Une fois l'investissement réalisé et le matériel opérationnel, l'agriculteur n'a plus qu'à récolter ses graines de colza ou tournesol (ou à les acheter) afin de produire son carburant. Il faut stocker les graines si possible à coté de la presse, l'idéal est de placer le stock de grains au dessus de la presse de façon à l'alimenter par gravité. Il est préférable que la presse soit elle-même en hauteur, ou qu'elle soit équipée en sortie d'un système de vis sans fin permettant la manutention du tourteau pour son stockage.

Les presses sont capables de fonctionner en continu, mais l'huile étant visqueuse, il semble cependant qu'elle risque d'obturer les ports de sortie de la presse. C'est pourquoi une heure de surveillance quotidienne semble être une moyenne pour l'entretien (nettoyage de la presse et des filtres, mise en route…) et la surveillance de cet atelier. La purification de l'huile est réalisée en continu ou par charge, mais pour faciliter la surveillance et le travail, il est préférable de la faire par charge (le temps de travail est toujours estimé à environ 1 h/j).

Pour faciliter le confort et diminuer la pénibilité du travail, il est conseillé d'automatiser l'installation (pompes, arrêt automatique en cas de panne ou de débordement…) au maximum, limitant ainsi le temps consacré à la production d'HVP.

Enfin, une fois purifiée, l'huile doit être stockée dans les meilleures conditions possibles jusqu'à son utilisation carburant. Il en est de même pour le tourteau consommé par le bétail.

3.1.6 Consommation d'Huile Végétale Pure hors secteur agricole

L'utilisation d'HVP carburant autre que pour les tracteurs agricoles n'est pour l'instant pas encore autorisée. Mais faisons l'hypothèse que le gouvernement français vienne à reconnaître l'HVP comme carburant à part entière, à l'exemple de l'Allemagne.

3.1.6.1 Production

La production d'HVP, comme en Allemagne, pourrait rester la « propriété » des agriculteurs et permettre ainsi une diversification de leurs productions. Comme nous l'avons vu, les quantités d'HVP potentielles sont restreintes au regard de la consommation totale de gazole en Rhône-Alpes. Cependant, la production d'huile pourrait être la base de micro-filières locales. Pour être vendue, l'huile devra très certainement répondre à une norme carburant qui s'appuierait, par exemple, sur un itinéraire technique de production d'HVP précis (à définir par le biais d'expérimentations).

3.1.6.2 Chaîne logistique

Afin d'aboutir à un succès de cette filière de biocarburant, l'HVP doit satisfaire trois facteurs :

- le marché du carburant ;
- l'approvisionnement en grains ;
- la technologie de conversion des véhicules.

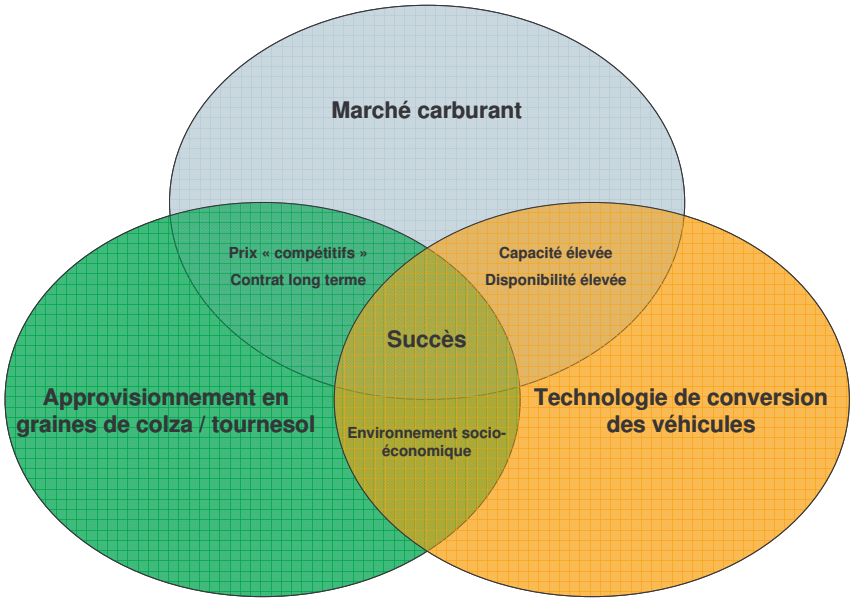


Figure 21 : Représentation de trois facteurs de réussite d'une filière.

Pour ce qui est du marché du carburant, celui-ci est une matière première indispensable pour la société contemporaine, il existe donc un réel marché porteur en termes d'énergie et principalement du carburant.

L'approvisionnement en graines assure la durabilité de la filière. Les ressources pour la production d'HVP (graines d'oléagineux) doivent être facilement disponibles afin de ne pas pénaliser l'organisation de la filière.

Des technologies de conversion sont aussi à mettre en place pour un développement de l'HVP carburant. Les moteurs Diesel devant subir quelques transformations, il est indispensable de se baser sur des experts compétents et compétitifs, accompagnant une validité technique de modifications à mettre en œuvre.

Ces trois facteurs regroupés (*Figure 21*) permettront à la filière HVP d'atteindre des prix « compétitifs », une capacité élevée si les modifications moteurs suivent ce marché carburant, et aussi le développement d'un environnement socio-économique autour de cette micro-filière locale.

3.2 L'Ester Méthylique d'Huile Végétale

(Diester Industrie, 2004)

L'EMHV de Diester Industrie, le Diester®, est un carburant pour moteur Diesel de série, il est parfaitement substituable au gazole. Après des années d'expérimentation en laboratoire, sur banc moteur et tests sur des centaines de véhicules, Diester Industrie préconise une utilisation optimale (technique, économique et environnementale) de 30 % de Diester® en mélange avec du gazole. En 2004, 387 500 tonnes de Diester® ont été produites sous agrément, représentant 1 % du marché carburant français.

Le Diester® utilisé à 30 % dans le gazole apparaît comme une solution simple car il fonctionne avec les moteurs Diesel actuels, ne nécessite aucun réglage moteur ni investissement financier conséquent, est totalement réversible et n'entraîne pas de bouleversement des méthodes pour remplir les cuves et/ou les réservoirs de carburant (mélange réalisé préalablement).

Partenaires Diester regroupe les collectivités dont les flottes captives incorporent 30 % de Diester® dans le gazole, c'est le taux optimum environnemental. D'un point de vue pratique, les flottes captives doivent disposer d'une cuve classique de stockage carburant ; mais avant de passer au mélange Diester® + gazole, il est impératif qu'ils procèdent au nettoyage de la cuve carburant, puis à un nettoyage régulier tous les 6 ans. Ces nettoyages comprennent à la fois la vidange complète du pied de cuve mais également le nettoyage des parois si celles-ci sont recouvertes d'un dépôt noir ancien. Le carburant livré est utilisable en l'état puisque le mélange Diester® 30 % - gazole 70 % est effectué préalablement par le distributeur pétrolier afin de faciliter son utilisation et de bien respecter le taux d'incorporation du biocarburant.

Un taux de 1 à 5 % est le taux banalisé de Diester® mélangé au gazole qui est distribué en station service. Cependant, au niveau des véhicules, certaines précautions sont à prendre.

♦ ***Véhicules anciens***

Des dépôts peuvent s'être accumulés dans leur réservoir ; dans ce cas, la meilleure solution consiste à effectuer une vidange complète et un rinçage du réservoir. Il faut aussi surveiller les filtres à carburant dès les premiers 1 000 km après le passage au mélange Diester® + gazole ; l'acidité du Diester® risque en effet de « nettoyer » le circuit carburant des dépôts de gazole et par conséquent de boucher les filtres. Dès que le filtre à carburant (mélange) reste propre la durée normale d'entretien peut reprendre.

♦ ***Véhicules neufs***

En principe les réservoirs doivent être propres, néanmoins un contrôle de l'état des filtres à carburant dès les premiers milliers de kilomètres est préconisé.

L'utilisation de biocarburant comme le Diester® peut soulever des incertitudes concernant les émissions de polluants. À ce sujet, il faut souligner que les groupes PSA Peugeot Citroën et IRISBUS (motorisation Cursor) donnent leur garantie pour les véhicules Diester® quant au respect de la norme Euro III. Aujourd'hui, Diester Industrie est dans une position d'attente pour garantir l'utilisation du mélange 70 % gazole - 30 % de Diester® dans le cadre d'une motorisation à injection haute pression.

Depuis janvier 2003, la garantie provisoire de la norme Euro III pour les membres adhérents Partenaires Diester se substitue à celle de certains constructeurs motoristes. Sur les années 2003 - 2004, aucun incident dû à l'usage de Diester® n'est intervenu sur les moteurs Euro III des flottes captives.

De même, les biocarburants sont souvent décriés pour des problèmes de surconsommation. Certes, le pouvoir calorifique du Diester® est légèrement inférieur à celui du gazole, mais après 10 années d'utilisation du Diester® pour leurs flottes captives, les membres de Partenaires Diester s'accordent à dire qu'ils ne notent pas de surconsommation ou que si elle existe, elle est très marginale. Par exemple, la RATP, dans son expérimentation actuelle, considère « qu'il n'y a pas de mise en évidence de surconsommation ».

3.3 Tourteaux gras

La trituration d'oléagineux à la ferme entraîne deux coproduits majeurs : de l'huile et du tourteau fermier gras. Schématiquement, ce procédé permet d'obtenir une quantité de tourteau deux fois plus importante que d'huile. Pour une production de 30 q/ha, la trituration donnera environ 1 tonne d'huile et 2 tonnes de tourteau gras. Cependant, il ne faut pas confondre tourteau industriel et tourteau gras, ni tourteau de colza / tournesol et tourteau de soja.

3.3.1 Le tourteau de colza et de tournesol en France

En France, le tourteau de soja industriel, riche en protéines et en énergie, reste prédominant dans l'alimentation animale : 71 % de la consommation totale de tourteau en 2002. En diminution jusqu'à l'interdiction des farines animales, le tourteau de soja est passé de 65 à 71 % de la consommation française entre 2000 et 2002.

La part du tourteau de colza s'est aussi fortement accrue, en passant de 5 % en 1981 à 15 % en 2002. Le développement du colza 00 (suppression quasi-totale de l'acide érucique et des glucosinolates contenus dans la graine de colza) en est la principale raison. L'utilisation de tournesol s'est aussi développée, mais dans une moindre mesure (de 3 à 9 % entre 1981 et 2002).

La production française de tourteaux couvrait en 2001 27 % de la demande nationale. La France demeure donc fortement importatrice de tourteaux : 5,4 milliers de tonnes en 2002, dont 83 % en tourteau de soja. Ces chiffres montrent la grande dépendance en protéines de la France, notamment envers le continent Américain.

Nous verrons dans cette partie comment valoriser un tourteau gras de colza ou tournesol. Mais actuellement, la filière Diester® produit 510 000 tonnes de tourteaux industriels de colza et tournesol, et projette d'en produire près de 750 000 tonnes d'ici 2007. Antoine MORIN, membre de Diester Industrie, nous a indiqué que les tourteaux de la filière Diester® sont bien évidemment utilisables en alimentation animale. Cependant, il nous a aussi confié qu'une grande partie de ces tourteaux sont aujourd'hui exportés dans le Nord de l'Espagne pour l'alimentation animale.

L'arrivée sur le marché de quantités accrues (filière EMHV + HVP) de tourteau de colza et tournesol nécessite de faire le point sur leurs caractéristiques alimentaires, d'autant plus que la rentabilité économique de ces filières passe par une bonne valorisation du tourteau fermier. Il serait donc intéressant de prendre les mesures nécessaires pour en assurer l'écoulement dans l'alimentation animale nationale. Ceci permettrait, par la même occasion, de diminuer la dépendance en protéines de la France.

3.3.2 Distinction entre tourteau industriel et tourteau gras

La principale différence entre ces deux types de tourteaux réside dans leur teneur en matières grasses. Les tourteaux industriels de colza ou de tournesol (comme ceux produits par la filière Diester®) ont des teneurs très faibles en matières grasses de 2,3 % pour le colza (en % de kg brut de tourteau) et de 1,9 % MG pour le tournesol. À l'opposé, les tourteaux fermiers gras ont des teneurs en matières grasses très variables qui sont fonction du procédé de trituration : type de presse, vitesse de rotation de la vis, diamètre de la buse de sortie… Ces tourteaux gras peuvent varier de 11 à plus de 25 % MG.

Les tourteaux industriels (type filière Diester®) sont pressés à chaud et déshuilés à l'hexane afin d'en extraire le maximum d'huile, d'où leur faible teneur en matières grasses.

Pour les tourteaux produits par des presses à la ferme, la matière grasse résiduelle pose deux problèmes : la limitation d'incorporation dans la ration des animaux et la conservation de cet aliment. En revanche, la production de tourteau fermier apporte un gage de traçabilité supplémentaire, en tant que tourteau non OGM, par exemple. De même, les éleveurs en production biologique auront un intérêt double, au niveau économique mais aussi traçabilité, à fabriquer un aliment riche en protéines à la ferme.

	unité (/kg brut)	Tourteau de colza industriel	Tourteau de colza fermier gras	Tourteau de colza fermier gras	Tourteau de colza fermier très gras	Tourteau de tournesol industriel	Tourteau de tournesol fermier gras	Tourteau de soja 48
Matière sèche	%	88,7		91		89		87,8
Protéines brutes	%	33,7				29		45,3
Cellulose brute	%	12,4		98		24		6
Matière Azotée Totale	%		28,1	27	23,3		22,9	
Matière grasse	%	2,3	23,1	21,8	36,1	1,9	15,5	1,9
Lysine	*g/kg*	9,4		10,8		10,7	9,4	15,8
Méthionine	*g/kg*	2,8		4,8		7,3		3,4
Calcium	*g/kg*	8,3				-		3,4
Phosphore	*g/kg*	11,4				-		6,2
UFL	*/kg*	0,85	0,99		1	0,59	0,79	1,06
UFV	*/kg*	0,8	0,93		0,94	0,5	0,67	1,05
PDIN	*g/kg*	219	171		143	195	167	331
PDIE	*g/kg*	138	93		90	99	85	229
Source :		*CETIOM*	*CA 14*	*AIRFAF Hte Normandie*	*CA 14*	*CETIOM*	*FRCUMA MP*	*INRA*

Figure 22 : Valeurs nutritivies de différents tourteaux. ***(PROLEA, CETIOM, 2001, 2003 ; CHAMBRE D'AGRICULTURE DU CALVADOS, 2005 ; AIRFAF HAUTE NORMANDIE, 2005 ; CLEMENT T. et al., 2003 ; INSTITUT DE L'ÉLEVAGE, ONIDOL, PROLEA, 2004)***

UFL/UFV : unité fourragère lait/viande (énergie) ;
PDIN/PDIE : protéines digestibles dans l'intestin lorsque le facteur limitant est l'azote / l'énergie.

3.3.3 Facteurs de variations du taux de matières grasses dans le tourteau

Une étude menée auprès d'éleveurs des Pays de la Loire a permis d'obtenir quelques informations concernant l'utilisation des presses et leur impact sur le taux de matières grasses du tourteau. Parmi les 19 élevages enquêtés, il a été mis en évidence un groupe à faible débit (14 kg graines/h), dont le taux moyen est inférieur de 3 % MG à celui du groupe à débit élevé (37 kg graines/h). L'étude montre aussi que certaines marques de presse, Reinartz (presse à cage) notamment, se distinguent en produisant du tourteau peu gras (entre 12 et 13 % MG).

Pour plus de détails sur le rendement d'extraction et donc la part d'huile résiduelle contenue dans le tourteau, se référer à la partie *2.2.3 Trituration et traitements de l'huile0*

3.3.4 Stockage du tourteau gras

La durée de conservation du tourteau gras dépend fortement de sa teneur en matières grasses, l'huile résiduelle étant responsable du rancissement. Cependant, aucune étude n'existe pour évaluer cette durée. D'après les expériences d'éleveurs rencontrés, un tourteau peut être conservé sur une durée de 6 mois à l'abri de l'air, de l'humidité et de la lumière. Au contact de l'air ambiant, une durée maximum de 3 mois semble être possible si le tourteau est stocké en tas.

Le stockage en silo hermétique et opaque avec récupération du tourteau par le bas semble être le plus efficace ; ainsi seule la couche supérieure de tourteau va sécher, permettant une bonne conservation du reste.

3.3.5 Valeurs nutritionnelles

Les valeurs disponibles dans la bibliographie sont assez rares. De plus, ce sont très souvent des extrapolations des tables INRA, corrigées en fonction du taux de matières grasses du tourteau (cas de l'analyse AIRFAF).

Les analyses de tourteaux fermiers gras, obtenues auprès de la Chambre d'agriculture du Calvados, AIRFAF et de la FRCUMA Midi-Pyrénées, montrent des valeurs en PDI[42] assez faibles pour les ruminants, liées à la forte solubilité des protéines (à la différence des tourteaux tannés). La forte concentration de matières grasses peut être un facteur d'acidose, il faut donc limiter la ration à environ 5-6 % MG par kg MS[43] chez les ruminants. Par exemple, des vaches laitières susceptibles d'ingérer environ 20 kg de fourrage, dont 15 kg d'ensilage de maïs à 3% MG, auront encore « de la place » pour 550 g d'huile qui pourra être apportée par 4,6 kg de tourteau à 12 % MG ou 2,4 kg de tourteau à 23 % MG.

De nombreux essais ont déjà été menés par l'Institut de l'Élevage sur la possibilité de substituer du tourteau de soja 48[44] par du tourteau de colza industriel. Ces tests ont montré qu'1 kg de tourteau de soja peut se substituer, en partie ou en totalité dans la ration, par 1,5 kg de tourteau de colza. Ceci fait du tourteau de colza un aliment du bétail aujourd'hui reconnu.

[42] PDI : Protéines Digestibles dans l'Intestin.
[43] MS : Matière Sèche
[44] Tourteau de soja 48 : tourteau à 48 % de protéines et matières grasses.

Deux tourteaux fermiers gras testés aux Trinottières			
	Témoin	Reinartz	Täby
Tourteaux	Soja industriel	Colza fermier	Colza fermier
MG / kg MS	3 %	11,3 %	22,5 %
kg de tourteau / kg de graines	-	0,6	0,69
PDIE / kg MS	229 g	127 g	112 g
Tourteau fermier / VL[45] / jour	2,8 kg	5,5 kg + 0,5 kg T soja	3,3 kg + 1,6 kg T soja
Taux de MG de la ration	2,9 %	4,3 %	5,6 %

Tableau 34 : Caractéristiques de tourteaux de soja et de colza fermier.
(INSTITUT DE L'ÉLEVAGE, 2005)

[45] VL : Vache Laitière.

Les synthèses d'essais de l'Institut de l'Élevage et du CETIOM montrent en production bovins-lait que le remplacement de 1 kg de tourteau de soja par 1,5 kg de tourteau de colza n'entraîne pas de baisse de consommation d'ensilage de maïs (que ce soit en début de lactation ou en phase descendante). L'ingestion de la ration totale est légèrement augmentée (+1,1 kg MS), du fait d'un apport supplémentaire de tourteau. Les vaches consomment jusqu'à 6 kg de tourteau de colza, sans problème d'appétence. Comparée à une ration à base de tourteau de soja, avec une ration à base de « colza », la production laitière est légèrement augmentée (+0,6 kg/j), le taux butyreux est réduit (-1,2 g/kg) et le taux protéique a tendance à augmenter (+0,3g/kg). La reprise de poids est également plus importante pour les animaux nourris au tourteau de colza.

Or actuellement, en France, aucun essai avec des tourteaux gras de colza ou de tournesol n'a été publié. La première et unique expérimentation française est en cours de réalisation par l'Institut de l'Élevage et la Chambre d'Agriculture du Maine et Loire à la ferme expérimentale des Trinottières (49).

Cette expérimentation, sur vaches laitières, se base sur la comparaison de trois rations à base d'ensilage de maïs :

- une **ration témoin** avec 2,8 kg de tourteau de soja industriel à 3 % MG ;
- une **ration avec 5,5 kg de tourteau fermier gras de colza à 11,3 % MG** issu d'une presse Reinartz, et complémentée par 0,5 kg de tourteau de soja industriel ;
- une **ration avec 3,3 kg de tourteau fermier gras de colza à 22,5 % MG** issu d'une presse Täby, et complémentée par 1,6 kg de tourteau de soja industriel.

Cet essai se terminant à l'automne 2005, nous n'avons pas pu obtenir les résultats. Ils devraient être communiqués fin 2005. Cependant, M. BRUNSCHWIG (Institut de l'Élevage) nous a dit explicitement que les quantités de lait produites par les deux rations à base de tourteau fermier gras étaient supérieures à la ration témoin. De même, ces deux rations sont d'après lui, très bien ingérées par les vaches.

Concernant les taux butyreux et protéique, les résultats de l'expérimentation ne sont pas communicables pour l'instant. M. BRUNSCHWIG s'accorde à dire que l'on ne peut pas généraliser en admettant que l'ingestion de tourteau fermier gras entraîne forcément une hausse du TB[47] ; des acides gras insaturés, comme l'acide linolénique (C_{18-3}) par exemple, entraînent une diminution de ce taux. De même, toujours selon l'Institut de l'Élevage, le TP[48] peut être influencé par la présence d'une forte quantité de matières grasses dans le rumen, qui peut alors diminuer la synthèse de PDIN. Ces premiers résultats restent à confirmer par l'analyse complète des données de l'expérimentation de la ferme des Trinottières.

Il est donc difficile à l'heure actuelle de définir des taux de substitution validés par les Instituts techniques, principalement par manque de références expérimentales.

[47] TB : Taux Butyreux.
[48] TP : Taux Protéique.

3.3.6 Incorporation dans l'alimentation animale

3.3.6.1 Cas des porcs

(AIRFAF, 2005)

AIRFAF Sud-Est préconise des utilisations précises d'incorporation de tourteau gras de colza et de tournesol dans l'alimentation des porcs. Cependant, leurs préconisations sont basées uniquement sur des extrapolations des valeurs de référence des tables d'alimentation INRA, et ces valeurs d'incorporation n'ont toujours pas été validées en station expérimentale.

✯ *Tourteau gras de colza*

Pour un tourteau gras de colza à 18 % MG dans une formulation à base de blé, il est possible d'en introduire, selon AIRFAF Sud-Est :

- 10 % dans l'aliment truie,
- 10 % dans l'aliment porcelet,
- 15 % dans les aliments porc charcutier.

Ces taux d'incorporation, pour un tourteau gras de colza à 18 % MG, prennent en compte l'énergie nette et la lysine digestible. D'après leur calcul :

1 kg de tourteau gras colza = 0,66 kg de blé + 0,4 kg de tourteau de soja

Pour les éleveurs utilisant du maïs dans l'alimentation des porcs charcutiers, les quantités utilisables sont plus difficiles à estimer. Elles dépendent de la quantité de maïs dans la ration et de la quantité de matières grasses du tourteau ; l'étude doit se faire au cas par cas.

✯ *Tourteau gras de tournesol*

AIRFAF Sud-Est envisage l'utilisation de tourteau gras de tournesol seulement pour les truies en remplacement du tourteau de tournesol industriel (utilisé pour un apport de cellulose) :

- 10 % dans l'aliment truies gestantes,
- 5 % dans l'aliment truie en lactation.

1 kg de t. gras de tournesol = 0,47 kg d'orge + 0,71 kg de t. de tournesol industriel

3.3.6.2 Cas des volailles

(CLEMENT T. et al., 2003)

Le tourteau de colza est proscrit dans l'alimentation des poules pondeuses du fait de la présence de sinapine qui donne un goût de poisson aux œufs.

Sinon, les tourteaux gras de colza et tournesol peuvent être incorporés à l'alimentation des volailles de chair, en respectant les contraintes de formulation dont un taux d'incorporation élevé en céréales (> à 50 %) et le respect d'un taux maximum de 5 % MG dans l'aliment. L'incorporation de tourteau gras dans l'aliment des volailles ne semble a priori pas poser de problème majeur (hormis pour les poules pondeuses) du moment que l'aliment formulé permet la couverture des besoins des animaux. Cependant, des essais pourraient être menés afin de déterminer exactement les seuils d'incorporation de tourteau gras dans l'alimentation des volailles.

3.3.6.3 Cas des ruminants

Le tourteau gras de colza ou tournesol vient en substitution au tourteau de soja, ou autres sources protéiniques. Dans les rations bovines, le tourteau est incorporé pour équilibrer la ration en énergie (UF[49]) et azote (PDI). Les études en cours sur vaches laitières montrent que l'équilibre de la ration, à base d'ensilage de maïs, est permis par l'incorporation partielle de tourteau gras. Une ration à base d'ensilage de maïs possède un taux de 3 % MG, ce qui explique la difficulté à équilibrer la ration en substituant totalement le tourteau de soja par du tourteau gras de colza ou tournesol. Si l'éleveur souhaite incorporer du tourteau gras en remplacement total du tourteau industriel, il faut alors raisonner les types de fourrages apportés dans la ration de base afin de diminuer les quantités de matières grasses à la base.

La règle principale, pour l'incorporation de tourteau gras dans la ration des bovins, est de respecter un taux maximum de 5 à 6 % MG.

✯ *Expérience belge d'engraissement de taurillons*

(JOYE P., 2003)

Une expérimentation sur l'engraissement de taurillons a été réalisée en Belgique par la Faculté des Sciences Agronomiques de Gembloux. Le but de ce test était de comparer les performances zootechniques des taurillons blanc-bleu-belges culards engraissés avec un régime contenant du tourteau de colza fermier par rapport à un régime témoin avec du tourteau de lin et du Tefex (aliment contenant de la graine de lin expandée). Les paramètres suivis ont été :

- le **Gain Moyen Quotidien (GMQ)**(kg/j) ;
- la **consommation d'aliment** (kg/j/taurillon) ;
- l'**Indice de Consommation (IC)** (kg aliment / kg poids vif).

Une ration avec 16 % du complément en tourteau fermier gras de colza (soit 1,6 kg/jour) atteint une teneur totale de 6 % MG, contre 4,45 % pour la ration témoin.

[49] UF : Unité Fourragère.
[53] GMQ : Gain Moyen Quotidien.

Les conclusions de cette expérimentation, à l'issue d'une période de 4 mois, montrent que le tourteau de colza fermier gras peut très bien être utilisé dans la ration : le GMQ[53] est identique (1,62 kg/j) et l'IC[54] augmente légèrement (6,06 kg aliment/kg poids vif contre 6,21 pour la ration témoin). De même, aucun problème d'appétence n'a été constaté avec le régime tourteau gras de colza.

Après abattage des animaux, aucune différence d'aspect, de couleur et de texture n'a été décelée sur les carcasses. À ce jour, les résultats obtenus en découpe et les qualités gustatives des viandes n'ont pas été vérifiés, mais aucune dépréciation n'a été constatée.

Concernant les ovins et les caprins, aucune expérience scientifique n'a été encore été menée à notre connaissance. Mais son utilisation reste totalement possible d'après les témoignages d'éleveurs recueillis dans la presse agricole.

Nous avons vu qu'il est possible de valoriser le tourteau gras de colza et tournesol dans l'alimentation du bétail. Cependant, le respect des contraintes de formulation des rations est très important et peut limiter l'incorporation de ces concentrés.

Il semble donc indispensable de multiplier les essais en station expérimentale afin que les tourteaux gras soient référencés dans les tables INRA. Ce serait un moyen sûr pour que les éleveurs viennent à incorporer à grande échelle et sans risque les quantités optimales de tourteaux gras dans leur ration.

3.3.7 Possibilités d'utilisation par les fabricants d'aliments du bétail

(GUILLEMAUD M., 2005)

L'utilisation de tourteau gras de colza et tournesol par les usines d'aliments du bétail peut être aussi une source importante de valorisation des tourteaux. La société Sanders Charente, filiale de Sanders Océan, a montré l'exemple au cours de cette année en achetant les tourteaux fermiers d'un groupe de 10 agriculteurs équipés d'une presse. Parmi eux se trouvaient évidemment certains éleveurs et fidèles clients de la société, mais d'après François BARON (responsable des achats et de l'approvisionnement en matières premières et de la formulation pour Sanders Océan), ce service rendu apparaissait comme une évidence de leur part.

L'accord pour commercialiser à Sanders Océan s'est réalisé sur la base des analyses fournies par la Chambre d'agriculture et avec une quantité minimum pour chaque livraison. Les agriculteurs, tous situés dans un rayon de 15 km de la société, livrent (une seule livraison pour tout le groupe) directement à l'usine en apportant en tracteur le tourteau gras.

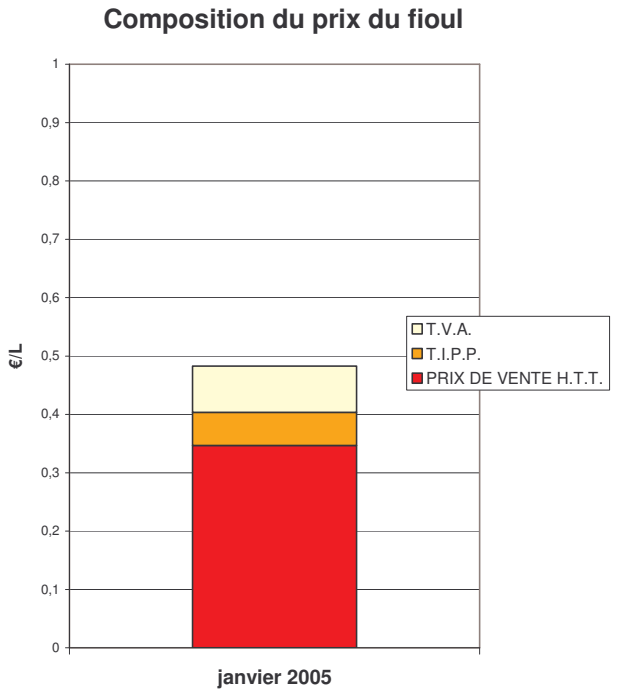
Pour information, une analyse de tourteau avec matière sèche, matière minérale, azote total, cellulose brute, PDIN, PDIE, UFL[58], UFV[59] et MAD[60] coûte environ 45 €, auxquels il faut ajouter 16 € environ pour une analyse du phosphore et du calcium.

[54] IC : Indice de Consommation.
[58] UFL : Unité Fourragère Lait.
[59] UFV : Unité Fourragère Viande.
[60] MAD : Matières Azotées Digestibles.

M. BARON nous a confirmé que l'achat de tourteau gras à ces producteurs est possible du fait que les analyses répondent au standard. Pour le tournesol par exemple, l'échantillon doit posséder 27 % de protéines et une teneur comprise en 8 et 10 % MG. Ce taux de matières grasses, très bas pour un tourteau gras de tournesol, nous a interpellé, mais ni M. BARON, ni les agriculteurs du groupe contactés, n'ont pu (ou voulu) nous répondre sur l'obtention de cette teneur si faible dans le tourteau. Il est fort probable, selon notre hypothèse, que pour arriver à des taux inférieurs à 10 % MG, les agriculteurs repassent les tourteaux dans la presse afin d'en extraire encore de l'huile et ainsi abaisser leur taux de matières grasses.

Une fois la barrière de la conformité du produit levée, il reste à fixer un prix d'achat du tourteau. Dans cet exemple, le prix est indexé sur la cotation départ de Bordeaux rendu Angoulême en vigueur le jour de l'accord, soit environ 115 €/t pour le tournesol (et 150 €/t pour le colza). Pour le fabricant d'aliment, le risque n'est pas très important, son seul souci étant le problème de rancissement du tourteau gras. Mais compte tenu des teneurs très basses en matières grasses, on peut considérer que ce risque était minime. De même, il est nécessaire, pour Sanders Océan d'avoir une cellule de stockage spéciale pour ce concentré ; c'est notamment pour cela que l'accord s'est fait sur la base d'une quantité minimale pour chaque livraison (actuellement 4 t/mois).

Cet exemple de valorisation de tourteau auprès d'une société d'aliment montre qu'il est possible pour des agriculteurs de valoriser un tourteau gras autrement que directement sur un élevage (autoconsommation). Ceci pourrait permettre aux exploitants agricoles non éleveurs de trouver un débouché pour ce coproduit de trituration.



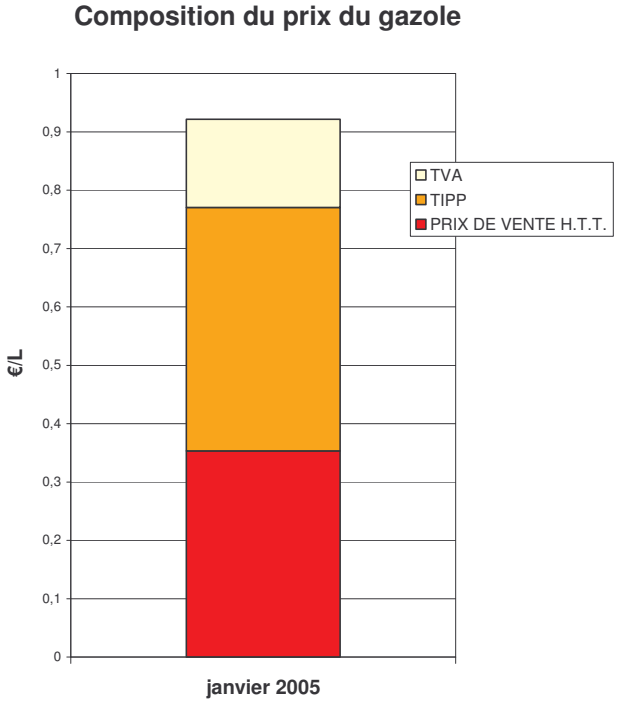


Figure 23 : Composition du prix des carburants.